



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ELÉCTRICA

Diseño de un molino de bolas con capacidad de 12 TM/h de molienda de carbón antracita, para mejorar la operación de la caldera TSX-G de lecho fluidizado de la empresa Trupal S.A.

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

Junior Alberto Jiménez Bazán

ASESOR

Ing. Mg. Mario Olivera Aldana

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

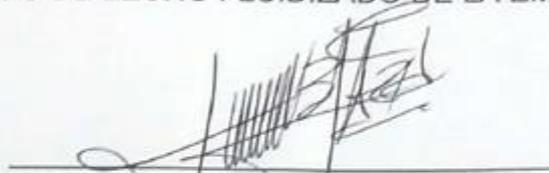
Modelamiento y Simulación de Sistemas Electromecánicos.

TRUJILLO – PERÚ

2017

PAGINAS PRELIMINARES

**“DISEÑO DE UN MOLINO DE BOLAS CON CAPACIDAD DE 12 TM/H DE
MOLIENDA DE CARBÓN ANTRACITA, PARA MEJORAR LA OPERACIÓN DE
LA CALDERA TSX-G DE LECHO FLUIDIZADO DE LA EMPRESA TRUPAL S.A.”**



Junior Alberto Jiménez Bazán

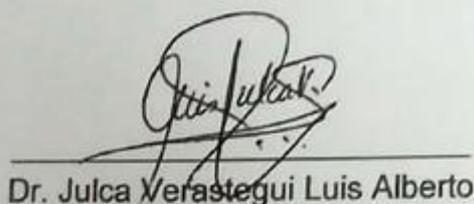
Autor

**Presentada a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad
César Vallejo de Trujillo para obtener el título de Ingeniero Mecánico
eléctrico.**



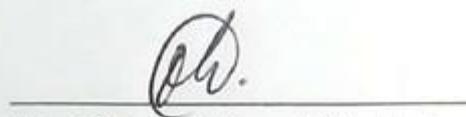
Dr. Inciso Vásquez Jorge Antonio

Presidente



Dr. Julca Verastegui Luis Alberto

Secretario



Mg. Olivera Aldana Félix Mario

Vocal

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi esposa **Bremilda Torres Cabrera**, por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.*

A mis adoradas hijas Antonella Madeleine y Hanna Gaela, a quienes siempre cuidaré para verlas hechas personas capaces y que puedan valerse por sí mismas.

A mis padres Luis Jiménez Tejada y Nancy Bazán Mendoza, que me dieron también las fuerzas necesarias para seguir adelante en este reto de superación en el ámbito profesional.

AGRADECIMIENTO

Debo agradecer de manera especial y sincera al Ing. Jorge Inciso Por su dirección en este trabajo de tesis. Su apoyo para guiar mis ideas en el desarrollo de esta tesis, y en la formación como Ingeniero Mecánico Eléctrico.

También deseo mi agradecimiento a todas aquellas personas que con su apoyo me han ayudado a realizar este trabajo para mi titulación en el campo de ingeniería. Agradecer especialmente al ing. David Salazar y Andy Zavaleta jefe de operaciones de la empresa papelera Trupal S.A, al Ing. Mario Olivera Aldana docente de la facultad d ingeniería de la universidad cesar vallejo, quienes amablemente acepto ser mi tutor especialista durante este tiempo. Dándome siempre su valiosos consejo y disponibilidad hacia mi persona para desarrollar y culminar mi proceso de tesis.

A mi compañero de trabajo en el área de planta fuerza de TRUPAL s.a. Martin Ocon, Marlo Bobadilla Carlos paz, Jaime Gutiérrez y Luis Murillo, ya que con su apoyo pude presentarme en aulas durante toda mi formación profesional.

A la Universidad Cesar Vallejo; por su excelente plana Docente. Y a todas aquellas personas que, de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.


Agradezco a Dios por llenar mi vida de dicha y bendiciones. A mis queridos padres por forjarme con buenos principios, creer en mí y darme la oportunidad de realizarme en esta profesión.

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo: Junior Alberto Jiménez Bazán, con DNI N°4212799, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica, declaro bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, 21 de abril del 2017.



Junior Alberto Jiménez Bazán
Autor

ÍNDICE

PAGINAS PRELIMINARES	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
DECLARACION DE AUTENTICIDAD	V
ÍNDICE.....	VI
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática:.....	12
1.2. Trabajos previos	14
1.3. Teorías relacionadas al tema	16
1.3.1. Caldera acuotubular en lecho fluidizado	16
1.3.2. Molino de Bolas	19
1.3.3. Ley de Bond	22
1.3.4. Parámetros de operación de un molino de bolas	23
1.3.5. Análisis de transmisión por cadenas	27
1.3.6. Diseño del eje	29
1.3.7. Rodamientos	31
1.3.8. Retorno operacional de la inversión (ROI).	31
1.4. Formulación del problema.....	32
1.5. Justificación del estudio.....	32
1.5.1. Relevancia económica	32
1.5.2. Relevancia tecnológica	32
1.5.3. Relevancia institucional	32
1.5.4. Relevancia socio-ambiental:	32
1.6. Objetivos	33
1.6.1. Objetivo General.....	33
1.6.2. Objetivos específicos	33
II. MÉTODO	35
2.1. Diseño de investigación	35
2.2. Variables.....	38

2.2.1.	Variables independientes	38
2.2.2.	Variables dependientes	38
2.3.	Operacionalización de las variables	39
2.3.1.	Población:	40
2.3.2.	Muestra:	40
2.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
2.5.	Métodos de análisis de datos	41
2.6.	Aspectos éticos	42
III.	RESULTADOS	42
3.1.	Balance de masa y energía a la caldera acuotubular TSX-G en condiciones actuales con molino de martillo	42
3.2.	Tabla de características y especificación para el diseño del molino de bolas	46
3.3.	Estructura de funciones para generar tres conceptos del diseño de molino de bolas	50
3.4.	Caja negra	52
3.5.	Matriz Morfológica:	53
3.6.	Conceptos de evaluación	54
3.7.	Diseño del molino de bolas.....	59
3.7.1.	Determinación del consumo específico de energía con molino de bolas	59
3.7.2.	Evaluación de la geometría del molino de bolas	60
3.7.3.	Cálculo de la potencia del motor	63
3.7.4.	Cálculo del % de velocidad crítica a la que debe operar el molino:	66
3.7.5.	Tamaño máximo de las bolas de acero	67
3.7.6.	Volumen de carbón pulverizado por cada revolución	68
3.7.7.	Análisis al sistema de transmisión de potencia	69
3.7.8.	Diseño del eje de transmisión de potencia del molino de bolas, rodamientos, soldadura	75
3.7.9.	Cálculo de esfuerzos	81
3.7.10.	Dimensionamiento y selección de rodamientos	86
3.7.11.	Dimensionamiento y selección de rodamientos del eje motriz	91
3.7.12.	Diseño del cilindro del molino de bolas	93
3.7.13.	Peso que soportará la estructura del cilindro del molino de bolas.....	95
3.7.14.	Cálculo del revestimiento interno del molino de bolas:	96
3.7.15.	Dimensionamiento de pernos para las placas del revestimiento	98

3.7.16.	Dimensionamiento y selección de pernos para catarina	100
3.7.17.	Análisis de soldadura	102
3.8.	Modelo en Solidworks del molino de bolas	105
3.9.	Balance de masa y energía en la caldera acuotubular TSX-G en condiciones de mejora con molino de bolas.	108
3.9.1.	Rendimiento energético en mejora del caldero acuotubular	108
3.10.	Análisis económico	109
	Costo de energía eléctrica con molino de martillos (CMM)	109
	Costo de energía eléctrica con molino de bolas (CMB)	109
	Costo de inversión de fabricación de molino de bolas	110
	Costo de materiales	110
	Costo de consumibles	110
	Costo de mano de obra	111
	Costo de transporte	111
	Costo total de inversión en fabricación y montaje.....	111
	Costo de mantenimiento del molino de bolas	112
3.11.	Beneficio económico	112
3.12.	Análisis Financiero	113
3.13.	El retorno de la inversión	116
3.14.	Periodo de retorno de la inversión	117
IV.	DISCUSIÓN	118
V.	CONCLUSIÓN	120
VI.	RECOMENDACIONES	122
VII.	REFERENCIAS	123
ANEXOS.....		125
A.1.	Fichas de registro	125
A.2.	Resultados de las fichas de registro.....	126
A.3.	Entalpia y temperatura de combustión en calderas acuotubulares	127
A.4.	Propiedades del vapor sobrecalentado y agua de alimentación de la caldera acuotubular	128
A.5.	Catalogo Siemens del motor eléctrico de accionamiento del molino de bolas	129

A.6. Catálogo del reductor de velocidad	131
A.7. Propiedades del acero	133
A.8. Densidad de productos	133
A.9. Factor de servicio	134
A.10. Factor de corrección por número de dientes	134
A.11. Factor de corrección por número de torones	134
A.12. Capacidad nominal de potencias tabuladas de cadenas	135
A.13. Dimensiones de cadenas estándares de rodillos	136
A.14. Factor de corrección por superficie	136
A.15. Factor de corrección por tamaño	137
A.16. Factor de corrección por temperatura	137
A.17. Factor de corrección confiabilidad	137
A.18. Tabla de propiedades de tubo de acero ASTM A-53 grado B	138
A.19. Valores sugeridos de la vida nominal de rodamientos SKF	139
A.20. Rodamiento SKF rígido de bolas	140
A.21. Tamaños de soldadura	143
A.22. Propiedades flexionante de la soldadura.....	143
A.23. Propiedades torsionante de la soldadura	144
A.24. Catálogo del electrodo E7018.....	145
A.25. Catálogo de pernos:	146
A.26. Catálogo de pernos:	148
A.27. Catálogo de piñones y cadenas	149

RESUMEN

El presente estudio, se realizó para diseñar un molino de bolas para la molienda del carbón antracita para mejorar el rendimiento de operación del caldero acuotubular TSX-G de lecho fluidizado de la empresa Trupal S.A.

En el capítulo primero se presenta la necesidad urgente de contar con un molino de bolas, justificando por el lado medioambiental y económico; asimismo, se cita la teoría necesaria para el diseño de este equipo. Se plantearon los objetivos específicos de modo que el diseño del molino de bolas se realice de manera ordenada, para cubrir la necesidad de molienda de 12 toneladas por hora. El flujo de actividades para lograr el objetivo que persigue esta tesis, se plasmó en un diagrama de flujo en el segundo capítulo, seguido de la identificación de las variables independientes y dependientes y como se operacionalizan.

En el tercer capítulo, se determinó el rendimiento de la caldera acuotubular mediante balances másico y energético, haciendo uso de la información recopilada de los molinos existentes y de los parámetros de funcionamiento de la caldera. El rendimiento de la caldera puede aumentar, mediante el incremento del área de transferencia de calor, esto es, disminuyendo el tamaño del carbón. Se diseñó un molino de bolas de acero ASTM A36, con un diámetro interior de 1000mm y una longitud de 1000 mm, con la finalidad de llevar el tamaño del carbón de 75mm hasta 0.1mm. Se calculó los diámetros de bolas y sus masas que en conjunto con la velocidad de operación se logre el pulverizado óptimo del carbón antracita de alimentación a la caldera. Se dimensionó y seleccionó un motor con su respectivo reductor de velocidad, con una potencia y velocidad de rotación según el proveedor. El sistema de transmisión, compuesto de cadena de 4 torones que redujo la velocidad del reductor hasta las revoluciones necesarias para la operación del molino. Se diseñó el eje transmitido, obteniendo un factor de seguridad aceptable, para lo cual fue necesario seleccionar un tubo SCH120. Se calculó el VAN obteniendo 1,296,259.14 US\$ U\$\$, con un TIR de 976.11%.

En los capítulos finales, se compararon los resultados obtenidos en esta tesis con los de otros autores. Se concluyó finalmente que el molino de bolas, presenta una mejora económica. Las recomendaciones, referencias, planos y anexos se encuentran en las últimas páginas de este documento.

Palabra clave: Molino de bolas y caldera de lecho fluidizado.

ABSTRACT

The present study was carried out to design a ball mill for the grinding of anthracite coal in order to improve the performance of the operation of the TSX-G fluidized bed tank of Trupal S.A.

The first chapter presents the urgent need to have a ball mill, justifying the environmental and economic side; Likewise, the necessary theory for the design of this equipment is mentioned. Specific objectives were set so that the design of the ball mill was carried out in an orderly manner to cover the need for grinding 12 tonnes per hour. The flow of activities to achieve the objective pursued by this thesis was reflected in a flow chart in the second chapter, followed by the identification of independent and dependent variables and how they are operationalized.

In the third chapter, the performance of the aquotubular boiler was determined by means of mass and energy balances, making use of the information gathered from the existing mills and boiler operating parameters. The performance of the boiler can be increased by increasing the area of heat transfer, ie by decreasing the size of the coal. An ASTM A36 steel ball mill was designed with an inner diameter of 1000mm and a length of 1000mm, in order to bring the size of the coal from 75mm to 0.1mm. The ball diameters and their masses were calculated in conjunction with the operating speed to achieve optimum pulverization of the anthracite feed coal to the boiler. A motor was designed and selected with its respective speed reducer, with a power and speed of rotation according to the supplier. The transmission system, composed of 4-strand chain that reduced the speed of the reducer until the revolutions necessary for the operation of the mill. The transmitted axis was designed, obtaining an acceptable safety factor, for which it was necessary to select a SCH120 tube. The NPV was calculated obtaining 1,296,259.14 US \$, with a TIR of 976.11%.

In the final chapters, compare the results obtained in this thesis with the other authors. It was finally concluded that the ball mill presents an economic improvement. The recommendations, references, plans and annexes are found on the last pages of this document.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática:

La empresa papelera Trupal S.A esta dedicada a la fabricación de papeles y cartones a partir de bagazo desmodulado de caña de azúcar como materia prima principal. El tipo de papel es variado y la producción está destinada tanto para el consumo nacional y extranjero. En el área denominada “Planta De Fuerza” donde se realiza el proceso de cogeneración (Energía térmica y energía eléctrica), actualmente cuenta con una caldera TSX –G de lecho fluorizado con carbón antracita procesada en un molino de martillo. La caldera trabaja a una presión de 70 bar manométricos, para generar 10 MW de energía eléctrica en un turbogenerador, consumiendo 12 TM/h de carbón y 11.73 TM/h de médula de bagazo.

En la actualidad para el preparado de carbón antracita para la combustión del caldero, se realiza a través de un molino de martillos, donde el resultado de la trituración son tamaños en un rango de 15mm a 75mm, ocasionando una serie de problemas en la operación del caldero, comenzando desde la obstrucción en los diafragmas porque solo permiten el paso de tamaños de carbón de máximo de 8mm. Debido al tamaño del carbón, se obtiene mayor humedad e incremento en la temperatura de combustión de hasta 1000°C; lo cual produce obstrucciones en los conductores, toberas fundidas, tuberías de vapor fracturadas. Además, cuando ocurren estos problemas, para mantener estable la presión de la caldera se con lleva a enlazarse o sincronizarse en paralelo con la red de Hidrandina, realizando un gasto de consumo de energía eléctrica en su red, donde no se puede exceder más de 900 KW porque se tendría que pagar 7.00 \$/KW-h. Debido a esta problemática, la empresa Trupal en el año 2015, obtuvo una pérdida económica de 1 500 000.00 S. /año ocasionadas por la mala preparación del carbón antracita.

Por lo que se plantea convertir el tamaño del carbón que sale del molino de martillos en molienda o pulverización a un tamaño promedio de 10 – 300 μ m (0.01 – 0.3mm) en un molino de bolas, (Alcántara, 2008). Al convertir el tamaño del carbón o un nivel de molienda o pulverización, el porcentaje actual de humedad contenido en el carbón que es el 10% con un poder calorífico inferior de 5500 Kcal/Kg, se reduciría a porcentajes entre 0.5 – 1.5%, aumentando el poder calorífico inferior del carbón

antracita; logrando mejorar la operación del caldero (Fuente: Departamento de Mantenimiento – Trupal S.A).

1.2. Trabajos previos

Alcántara (2008), en su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico. Realizada en el Instituto Politécnico Nacional (México, D.F. - México), titulada: “Diseño práctico de un molino de bolas”, realizó la descripción teórica de los principales equipos de molienda existentes en la industria, así como sus partes y funcionamiento, además de enfocarnos en el diseño de la transmisión del molino de bolas para la obtención de molienda. Además de mencionar el mantenimiento que se debe de realizar para preservar en óptimas condiciones el molino, evitando pérdidas en la producción.

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

Real (2006), en su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico. Realizada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Guayaquil - Ecuador), titulada: “Diseño de un sistema para el proceso de molienda de carbón mineral para ser usado como combustible industrial”, Explico que el uso del carbón mineral como combustible industrial es su costo por unidad de energía, ya que este representa alrededor del 30% del costo del gas licuado de petróleo y 28% del costo del bunker, combustibles ampliamente usados a nivel industrial en nuestro medio. La molienda del carbón, permite dos efectos importantes: La deshidratación, puesto que la reducción del contenido de humedad tiene un efecto positivo en la tasa de transferencia de calor; y el aumento de la superficie específica, es decir, la superficie del carbón expuesta a la combustión por unidad de volumen.

Concluyendo que, dentro de la extensa clasificación de molinos, los aplicables a la molienda del carbón mineral son: el Molino Vertical de Rodillos y el Molino de Bolas.

Grueso & Herrera (2005), en su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico. Realizada en la Universidad Autónoma de Occidente (Cali - Colombia), titulada: “Diseño y construcción de un molino de bolas de alta energía y alta capacidad”, Detalla que utilizar molinos de bolas es una técnica fácil y económica, comparada con otros métodos tradicionales; además brinda la posibilidad de combinar materiales metálicos con no metálicos, abriendo así todo un horizonte para la investigación de nuevos materiales.

Concluyendo, que las herramientas computacionales CAD, fueron de gran importancia al momento de evaluar cada una de las soluciones que se plantearon dentro del desarrollo de este trabajo. El apoyo en la teoría de elementos finitos (Algor, Ansys), las modelaciones 3D (Solid-Edge, Solid Works, Visual Nastran), modelaciones 2D (Working Model) resultaron importantes al momento de tomar decisiones en la selección de piezas, materiales, mecanismos y demás elementos constituyentes del modelo puesto en consideración en este escrito. Estas herramientas se convierten de gran ayuda para el diseño con la que cuentan los ingenieros en la actualidad, ya que permiten predecir de manera muy cercana a la realidad el comportamiento de los materiales, permitiendo un ahorro de tiempo, dinero y brindando mayor confiabilidad a los diseños.

1.3. Teorías relacionadas al tema

1.3.1. Caldera acuotubular en lecho fluidizado

Las calderas acuotubulares en lecho fluidizado tienen gran potencial para quemar eficiente y limpiamente una gran variedad de combustibles, desde los que tienen altos contenidos de azufre, carbones con alto contenido de cenizas en todas sus categorías y grados, hasta desechos de las industrias de procesos.

Caldera apta para la utilización de combustibles sólidos como el carbón, en especial los de difícil combustión tales como: coque de petróleo, antracita y lignitos (con alta humedad, baja materia volátil y bajo poder calorífico), sin requerir el uso de combustibles auxiliares. Se basa en una combustión lenta a baja temperatura, mediante un material inerte caliente como la arena, que permite encender el combustible al quedar en contacto directo con dicho material, (<http://www.renovetecingenieria.com/>).

La caldera acuotubular en lecho fluidizado es abastecida por un alimentador de combustible (bagazo, carbón, etc.) tiene un suministro de aire bajo parrilla y sobre parrilla debido a la ayuda de los ventiladores forzados e inducidos el cual el forzado mandara aire bajo parrilla y el siguiente suministro lo ara encima en el hogar de la caldera el cual lograra así poder comenzar el proceso de combustión dentro del hogar de la caldera para que después transfiera el calor por los haces de tubos que están con agua y conducen hacia los domos superior e inferior el cual llega a su punto de vapor sobrecalentado el cual será conducido en una tubería de alta presión hacia planta de fuerza, trapiche, elaboración ,etc. Luego los gases calientes que emana en el hogar son aprovechados para calentar el aire que viene del ambiente para poder mejorar la combustión en la caldera después de aprovechar el aire del hogar esta para a través del lavador de gases en la cual el lavador de gases atrapa partículas sólidas a través de agua que se rocía en forma de bañera es así como lavador de gases reduce los gases que salen por la chimenea hacia el medio ambiente , además los desechos que salen del lavador de gases se recuperan siendo llevados a un decantador para así poder recuperar el agua que se utilizó para atrapar partículas esta agua reciclada en decantador será recuperada para de nuevo reutilizar en la caldera de lecho fluidizado.

Cabe recalcar la combustión en lecho fluidizado circundantes incluye la combustión de un combustible formado por partículas sólidas, en un lecho fluidizado (en suspensión) mediante la inyección de aire en el fondo del lecho .Cuando se quema carbón de esta manera ,el lecho puede consistir en solidos inertes ,cenizas de carbón , o un material absorbente como piedra caliza o dolomita en el lecho reaccionan con el dióxido de azufre formando durante la combustión del carbón y forma un sulfato solido que puede ser desechado en forma de solido seco.

En la figura 1.1 se muestra una caldera en lecho fluidizado

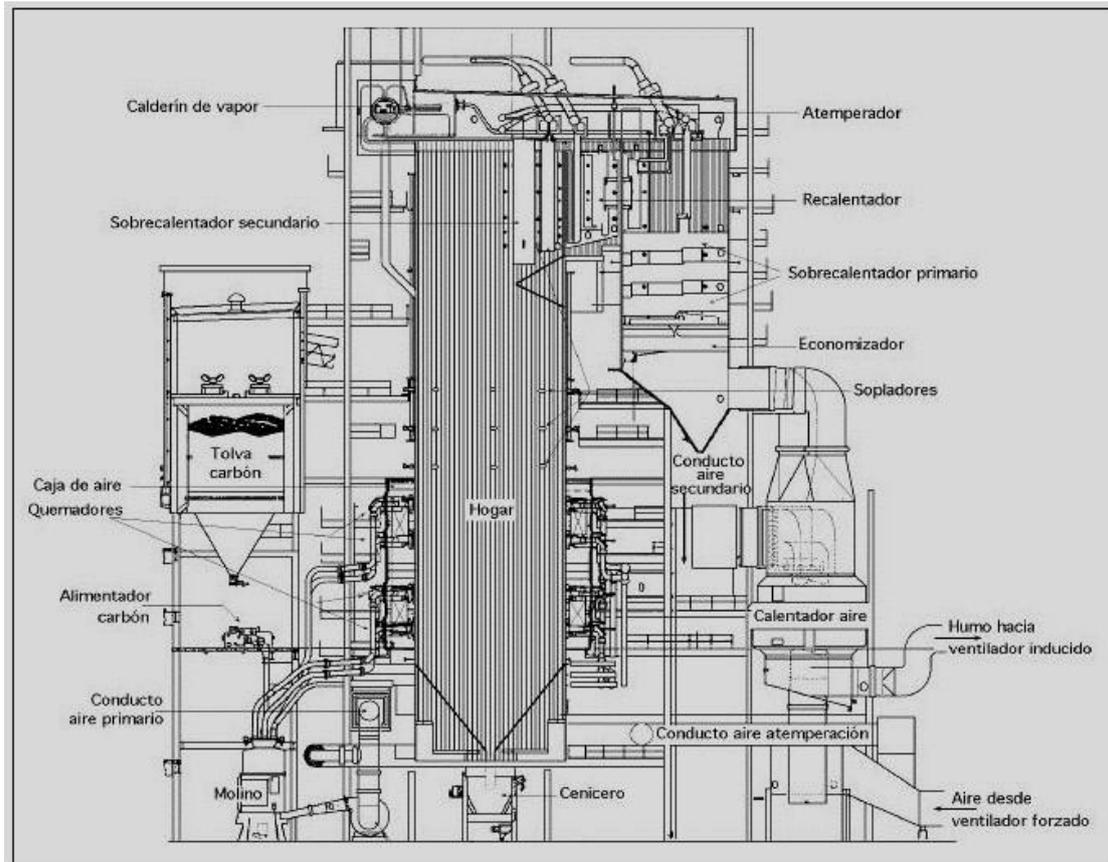
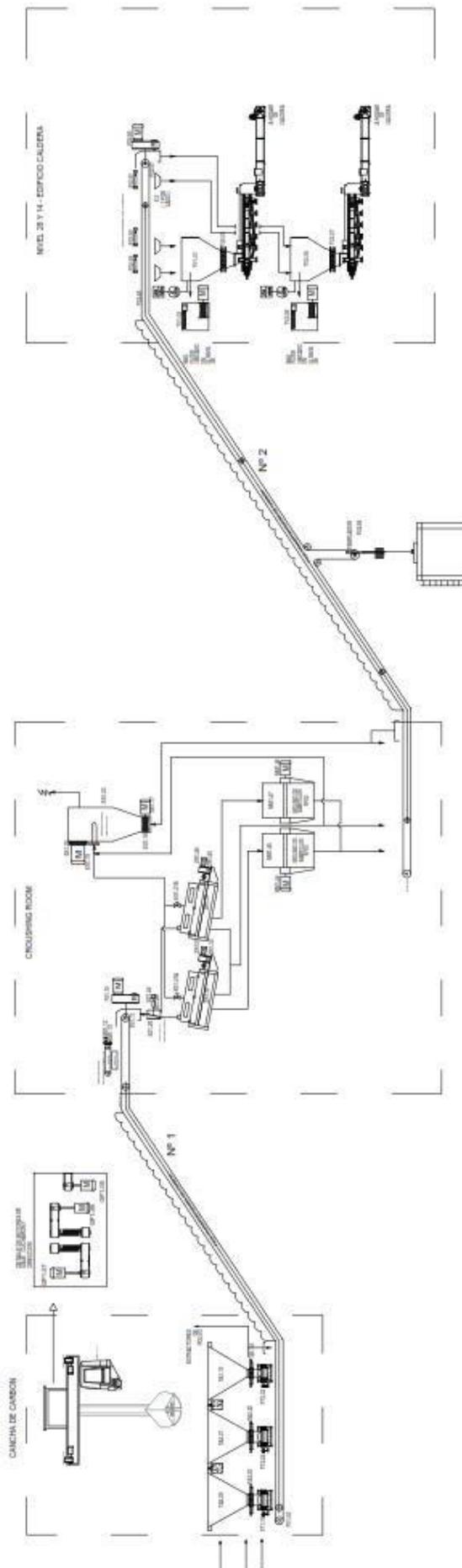


Figura 1.1, Caldera en lecho fluidizado con carbón Fuente:
Fernández, 1996



TRUPAL S.A. Trupal Comodoro Rivadavia S.A. - Santiago del Estero

ALIMENTACION DE CARBON CALDERA TSXG

TIPO:	JTK	FECHA:	01/01/11	BOCAL:	S/E	PLANO N°:	D
LEV./FOLIO:	JTK	FECHA:	01/01/11	ENTRADA:			
OTRO N°:	173404	FECHA:		BOCAL:			A2

El rendimiento energético se expresa, (Kenneth y Donald, 2001):

$$\eta_{\text{cald}} = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{\text{agua}})}{Q_{\text{total}}} * 100\%$$

Ec.(1.1)

Dónde:

η_{cald} : Rendimiento energético del caldero (%) \dot{m}_v : Flujo

másico de vapor producido por el caldero (Kg/s) h_{agua} :

Entalpia de líquido saturado del agua (Kg^{KJ})

Entalpia del vapor saturado (Kg) h_v :

Q_{total} : Potencia calorífica total (KW)

También, según la siguiente formulación, podemos determinar la entalpia máxima de gases caliente en el hogar de la caldera, para dos tipos de combustible consumidos, se tiene:

$$h_{\text{GC}} = \frac{\dot{m}_{\text{cble1}} * \text{PCI}_{\text{cble1}} + \dot{m}_{\text{cble2}} * \text{PCI}_{\text{cble2}}}{(1 + \text{Ratio}) * (\dot{m}_{\text{cble1}} + \dot{m}_{\text{cble2}})}$$

Ec.(1.2)

Donde: h_{GC} : Entalpia de gases calientes

(KJ/Kg)

$\text{PCI}_{\text{cble1}}$: Poder calorífico inferior del combustible primario (KJ/Kg)

$\text{PCI}_{\text{cble2}}$: Poder calorífico inferior del combustible secundario (KJ/Kg)

\dot{m}_{cble1} : Flujo másico del combustible primario (Kg/s) \dot{m}_{cble2} : Flujo

másico del combustible secundario (Kg/s)

Ratio: Relación aire – combustible (Kg aire/Kg combustible)

1.3.2. Molino de Bolas

a) Definición:

El molino de bolas consiste en un cilindro de acero que descansa horizontalmente apoyado sobre pedestales y gira alrededor de su eje horizontal. El material que se quiere moler se introduce en el cilindro a través de un registro situado en el centro de una generatriz del cilindro que se cierra después herméticamente. Se mantiene el molino girando durante un período variable y después se descarga a través una abertura opuesta, con mallas adecuadas para dejar pasar el material molido, pero suficientemente estrechas para retener las bolas, (<http://datateca.unad.edu.co/>).

b) Funcionamiento:

El molino gira por la acción de un engranaje circunferencial, mediante correas de transmisión planas o en forma de V múltiple, o bien por medio de rueda dentada y cadena articulada. En la industria es frecuente que el molino esté provisto de un engranaje externo, es decir, un engranaje situado por fuera de los pedestales que sirven de soporte, de forma tal que el molino pueda cubrirse convenientemente con una funda cuando sea necesario, (<http://datateca.unad.edu.co/>)

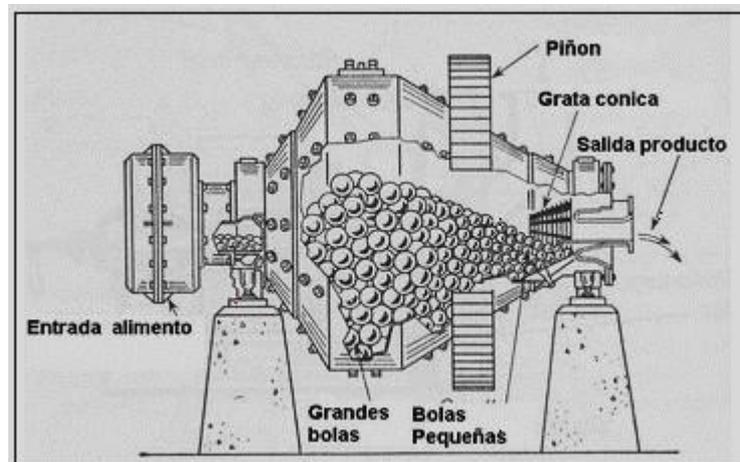


Figura 1.2: Molino de bolas Fuente:
<http://datateca.unad.edu.co/> [3]

c) Partes de un molino de bolas

A continuación, se detalla los principales fundamentos de un molino de bolas, (<http://www.monografias.com/>).

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

Chumaceras: se comporta como soporte del molino y la vez la base sobre la que gira el molino

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

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

Tapas: soportan los cascos y están unidos al trunión.

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

Trunión de descarga: es el conducto de descarga de la molienda, por esta parte se alimenta las bolas, sobre la marcha.

Cucharón de alimentación: normalmente forma parte del muñón de entrada del molino.

Trommel: Desempeña un trabajo de retención de bolas especialmente de aquellos que por excesivo trabajo han sufrido demasiado desgaste.

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

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

Cuerpos trituradores (Bolas): Los cuerpos trituradores van a ser utilizados en los molinos cuya acción de rotación transmite a la carga de cuerpos moledores fuerzas de tal naturaleza que estos se desgastan por abrasión, impacto y en ciertas aplicaciones metalurgistas por corrosión, (<http://www.monografias.com/>).

1.3.3. Ley de Bond

Bond postulo una ley empírica que se denominó la “Tercera Ley de la Conminación”. Siendo el enunciado:

La energía consumida para reducir el tamaño 80% de un material, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño 80%; siendo éste último igual a la abertura del tamiz (en micrones) que deja pasar el 80% en peso de las partículas, (Thomas & Filippov, 1999).

$$E = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{X_2}} - \frac{10}{\sqrt{X_1}} \right) \quad \text{Ec.(1.3)}$$

Donde:

E: Consumo Específico de Energía, (KWh/ton. corta molida)

X_1 : Tamaño 80% pasante en la alimentación, (μm)

X_2 : Tamaño 80% pasante en el producto, (μm)

W_i : Índice de Trabajo de Bond, indicador de la Tenacidad del mineral, (KWh/ton. corta)

La ecuación anterior es el resultado fundamental del trabajo de Bond y ha sido aceptada universalmente. La fórmula de bond tiene las dimensiones en toneladas

cortas, por lo que el resultado hay que multiplicarle por el factor de conversión (1.10231) para obtener el resultado en toneladas métricas.

Bond definió el parámetro el Work Index W_i (índice de trabajo del material), que corresponde al trabajo total (expresado en [kWh/ton. corta]), necesario para reducir una tonelada corta de material desde un tamaño teóricamente infinito hasta partículas que en un 80% sean inferiores a 100 [μm], (Thomas & Filippov, 1999).

Tabla 1.1, Valores de Work Index (índice de trabajo del material)

MATERIAL	WORK INDEX	MATERIAL	WORK INDEX
Barita	4.73	Granito	15.13
Bauxita	8.78	Grafito	43.56
Carbón	13.00	Caliza	12.74
Dolomita	11.27	Cuarcita	9.58
Esmeril	56.70	Cuarzo	13.57
Ferrosilicom	10.01		

Fuente: Thomas & Filippov, 1999.

1.3.4. Parámetros de operación de un molino de bolas

a) Potencia del motor para el accionamiento del molino de bolas

La potencia requerida para poder pulverizar el carbón antracita, depende del consumo específico energía y de la capacidad máxima de producción, (Thomas & Filippov, 1999).

$$P_M = 1.341 * E * \dot{m}_{\text{carbón antracita}} \quad \text{Ec.(1.4)}$$

Dónde:

P_M : Potencia del motor eléctrico del molino (HP)

E: Consumo Específico de Energía, (KWh/TM)

$\dot{m}_{\text{carbón}}$: Flujo carbón máximo, (TM/h)

antracita

b) Cálculo de la velocidad adecuada del molino:

Es la velocidad adecuada mínima a la cual puede operar el molino de bolas y se calcula mediante la siguiente formula, **(Jhon, 1987)**.

$$N_o = 56 - 40 \text{ Log } D \quad \text{Ec.(1.5)}$$

Dónde:

N_o : Velocidad de rotación adecuada del molino (rpm)

D = Diámetro interno de molino (pies)

c) Calculo de la velocidad crítica del molino:

Es la velocidad máxima a la cual puede operar el molino de bolas y se calcula mediante la siguiente formula, **(Jhon, 1987)**.

$$N_c = \frac{76.6}{D^{1/2}} \quad \text{Ec.(1.6)}$$

Donde:

N_c : Velocidad critica del molino (rpm)

D = Diámetro interno de molino (pies)

d) Volumen total útil del molino de bolas

Es el volumen total, comprendido por el volumen ocupado por las bolas y el volumen del carbón, **(Thomas & Filippov, 1999)**.

$$V_t = \frac{\pi * D^2}{4} * L \quad \text{Ec.(1.7)}$$

Donde:

V_t : Volumen total (m^3)

L: Longitud del molino (m)

D: Diámetro interior del molino (m)

e) Cálculo del % de volumen ocupado por las bolas dentro del molino:

Es el porcentaje del volumen que ocuparan las bolas de acero en el molino, **(Thomas & Filippov, 1999)**.

$$V_p = 113 - 126 \frac{H}{D} \quad \text{Ec.(1.8)}$$

Dónde:

V_p : Fracción de volumen ocupado por las bolas de acero

H : Distancia de la parte superior a la superficie nivelada (m)

D : Diámetro interior del molino (m)

f) Volumen ocupado por las bolas en el molino

Es el volumen ocupado por las bolas de acero en el molino, **(Thomas & Filippov, 1999)**.

$$V_b = V_p * V_t \quad \text{Ec.(1.9)}$$

Dónde:

V_b : Volumen ocupado por las bolas de acero (m^3)

H : Distancia de la parte superior a la superficie nivelada (m) D :

Diámetro interior del molino (m)

g) Peso de las bolas

Es el peso del conjunto de total bolas de acero en el molino y se determina, según la formulación, **(Thomas & Filippov, 1999)**.

$$W_b = (1 - p) * \rho_b * V_b \quad \text{Ec.(1.10)}$$

Donde:

W_b : Peso del conjunto de todas las bolas de acero (TM) p : Porosidad,

para un molino de bolas 0.48 **(Thomas & Filippov, 1999)**.

La porosidad es el espacio disponible entre bola y bola para poder pulverizar el carbón antracita. ρ_b : Densidad del acero ($\text{TM}_{\text{---m}^3}$)

V_b : Volumen ocupado por las bolas de acero (m^3)

h) Cálculo del % de velocidad critica a la que debe operar el molino:

Según la formulación, sería: **(Thomas & Filippov, 1999).**

$$C_s = 100 * \left[\frac{N_o}{N_c} \right] \quad \text{Ec.(1.11)}$$

Donde:

C_s : Porcentaje de velocidad Critica del molino (%)

N_o : Velocidad de rotación adecuada del molino (rpm)

N_c : Velocidad critica del molino (rpm)

i) Tamaño máximo de las bolas de acero

El tamaño máximo para el cumplimiento del tamizado, se determinada según la siguiente ecuación, **(Thomas & Filippov, 1999).**

$$B = \frac{\sqrt{X_1 * W_i} \sqrt{S}}{210 * C_s} D \quad \text{Ec.(1.12)}$$

Donde:

B: Tamaño máximo de las bolas en el molino (pulg)

X_1 : Tamaño 80% pasante de la alimentación, (μm)

W_i : Índice de Trabajo de Bond, indicador de la Tenacidad del mineral,
(Kwh/ton. corta)

C_s : Porcentaje de velocidad critica del molino (%)

S: Densidad del material a moler (Ton/m^3) D:

Diámetro interior del molino (pies).

1.3.5. Análisis de transmisión por cadenas

Para el análisis del presente proyecto, se analizará cadenas, para determinar las fuerzas aplicadas en los engranes, se procederá a emplear las siguientes formulas, **(Shigley, 2008)**.

a) Relación de transmisión de engranajes, **(Shigley, 2008)**

$$n_1 * d_1 = n_2 * d_2 \quad \text{Ec.(1.13)}$$

Donde: n_1 : Velocidad de rotación del engrane motriz

(rpm) n_2 : Velocidad de rotación del engranaje conducido

(rpm) d_1 : Diámetro primitivo del engrane motriz (pulg) d_2 :

Diámetro primitivo del engranaje conducido (pulg).

b) longitud de paso, **(Shigley, 2008)**

$$L = \frac{2 * C}{p} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4 * \pi^2 * C} \quad \text{Ec.(1.14)}$$

Donde:

L : Relación de la longitud de paso (pulg.) p

C : Distancia entre centros (pulg.)

N_1 : Numero de dientes de la Catarina motriz N_2 :

Número de dientes de la Catarina conducida p :

paso de la cadena (pulg.)

c) Distancia entre centros, **(Shigley, 2008)**

$$C = \frac{p}{4} \left[-A + \sqrt{A^2 - 8 * \left(\frac{N_2 - N_1}{2 * \pi} \right)^2} \right] \quad \text{Ec.(1.15)}$$

Donde:

$$A = \frac{N_1 + N_2}{2} \frac{L}{p}$$

Ec.(1.16)

d) Potencia permitida por la cadena, **(Shigley, 2008)**

$$H_a = K_1 * K_2 * H_{tab} \quad \text{Ec.(1.17)}$$

Donde:

K1: Factor de corrección por número de dientes

K2: Factor de corrección por número de torones

H_{tab} : Potencia tabulada (HP)

e) Potencia de diseño, **(Shigley, 2008)**

$$H_d = K_s * n_d * H_{\text{motor nominal}} \quad \text{Ec.(1.18)}$$

Donde:

K_s: Factor de servicio para impacto pesado n_d:

Factor de diseño

H_{motor} : Potencia nominal del motor (HP)_{nominal}

f) Momento torsor o torque, **(Shigley, 2008):**

$$T = \frac{30 * P}{\pi * n} \quad \text{Ec.(1.19)}$$

Donde:

T. Torque (N.m) P: Potencia

(W) n: Velocidad de rotación

(RPM)

g) Criterio de la distancia entre centros entre catarinas:

$$D < C < 3(D + d) \quad \text{Ec.(1.20)}$$

Donde:

D: Diámetro de la catarina conducida (m) d:

Diámetro de la catarina conductora (m)

C: Es la distancia entre centros (m)

1.3.6. Diseño del eje

Existen varias teorías que se pueden aplicar para predecir una falla en un eje, todo depende del material y del tipo de esfuerzos que soporta, **(Shigley, 2008)**.

a) Diseño por carga estática:

Por la teoría de la energía de distorsión **(criterio de Von Mises)**:

$$\sqrt{4(16\pi d M_3 + \pi^2 d P_z)^2 + 3(16\pi d T_3)^2} \geq S_{\pi y_s} \quad \text{Ec.(1.21)}$$

Donde:

d: Diámetro del eje (m)

M: Momento flexionante máximo (N.m)

P: Carga axial del punto crítico (N)

T: Torque del punto crítico (N.m)

S_y: Esfuerza de fluencia (Pa) n_s:

Factor de seguridad.

b) Diseño por fatiga:

La resistencia a la fatiga de un material es su capacidad de resistir cargas a fatiga. En general, es el valor del esfuerzo que puede resistir un material durante una cantidad dada de ciclos de carga. Si la cantidad de ciclos es infinita, el valor del esfuerzo se llama límite de fatiga.

Marín identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, el tamaño, la carga, la temperatura, varios otros puntos, **(Shigley, 2008)**. Por lo tanto, la ecuación de Marín se escribe:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * S'_e \quad \text{Ec.(1.22)}$$

Dónde:

S_e : Límite de fatiga k_a : Factor de modificación de la

condición superficial k_b : Factor de modificación de

tamaño k_c : Factor de modificación de la carga k_d :

Factor de modificación de la temperatura k_e : Factor

de modificación de diversos efectos

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria (laboratorio)

Y el límite de resistencia a la fatiga teórico es:

$$\begin{array}{ll} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ Kpsi (1 400 MPa)} \\ 1 00 \text{ Kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ Kpsi} \\ 700 \text{ Mpa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{array}$$

- Esfuerzos medios y alternos:

Para realizar el cálculo de falla por fatiga se usa los esfuerzos medios y alternos.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad \sigma_a = \frac{|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|}{2} \quad \text{Ec.(1.23)}$$

Donde:

σ_m : Esfuerzo medio o promedio.

σ_a : Esfuerzo alterno o de amplitud.

σ_{\max} : Esfuerzo máximo. σ_{\min} :

Esfuerzo mínimo.

- Criterio de falla:

Goodman – modificado.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad \text{Ec.(1.24)}$$

Dónde: S_y, S_{ut}, S_e, σ_a, y N. son el esfuerzo a la fluencia, el esfuerzo último a la tracción, límite de resistencia a la fatiga, esfuerzo medio, esfuerzo medio y el factor de seguridad respectivamente.

1.3.7. Rodamientos

A pesar de usar aceros de muy alta resistencia, todos los rodamientos tienen una duración finita, y terminarán por fallar debido a la fatiga causada por altos esfuerzos de contacto. La duración en horas de servicio de un rodamiento se calcula según la ecuación, (<http://www.skf.com/>):

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} * \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad \text{Ec.(1.25)}$$

Dónde:

L_{10h} = Duración en horas de servicio del rodamiento (horas) p=3

Para rodamiento de bolas y 10/3 Para rodamientos de rodillos C =

Capacidad de carga dinámica (N) n= Velocidad de rotación del

eje (rpm) P= Carga dinámica equivalente (N)

1.3.8. Retorno operacional de la inversión (ROI).

Es un parámetro que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial, (**Sowell, 2013**).

$$ROI = \frac{I}{B} \quad \text{Ec.(1.26)}$$

Dónde:

I: Inversión para la ejecución del proyecto [\$]

B: Beneficio logrado por el proyecto [\$/año]

1.4. Formulación del problema

¿Es posible diseñar un molino de bolas con capacidad de 12 TM/h de molienda de carbón antracita, para educir el tamaño del grano de carbón hasta 0.1mm e incrementar el rendimiento de la caldera TSX-G de lecho fluidizado de la empresa Trupal S.A.?

1.5. Justificación del estudio

1.5.1. Relevancia económica

El diseño de un molino de bolas para la molienda de carbón antracita, permitió la mejora de la operación del caldero acuotubular con respecto a la reducción de los costos de obstrucciones en conductores, fundición de toberas, fractura en tuberías de sobrecalentamiento. Además de eliminar la dependencia constante con el SEIN (Servicio eléctrico interconectado nacional); originando un ahorro significativo para la empresa Trupal S.A.

1.5.2. Relevancia tecnológica

El diseño de máquinas, como el molino de bolas, permitió obtener una molienda o pulverización del carbón antracita, mejorando la combustión del caldero acuotubular permitiendo que este proyecto sirva como guía para todas las empresas que tengan instaladas calderas con hogar de lecho fluidizado.

1.5.3. Relevancia institucional

La implementación de molinos de bolas para la molienda de carbón conllevó a la empresa Trupal S.A a mejorar su competitividad frente a otras Empresas. Permitiendo que el alumno de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Cesar Vallejo, aplique y extienda sus conocimientos al campo energético.

1.5.4. Relevancia socio-ambiental:

La pulverización del carbón mineral, permitió una reducción en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de azufre (SO₂); minimizando el impacto ambiental.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Diseñar un molino de bolas con una capacidad de 12 TM/h de molienda de carbón antracita, que permitirá reducir el tamaño del grano de carbón hasta 0.1mm e incrementar el rendimiento de la caldera TSX-G de lecho fluidizado de la empresa Trupal S.A.

1.6.2. Objetivos específicos

Realizar un balance masa y energía al caldero acuotubular TSX-G, en estado actual con molino de martillo, para determinar la temperatura de combustión de la mezcla de carbón antracita y médula de bagazo y eficiencia energética.

Establecer una tabla de características y especificaciones de los elementos del molino de bolas a diseñar, para poder generar 3 conceptos de molienda de carbón, capaces de satisfacer los requerimientos de ingeniería.

Realizar los cálculos que permitan el diseño del molino de bolas de la selección más óptima.

- Consumo específico del molino de bolas
- Diámetro y longitud del molino
- Potencia y velocidad del motor eléctrico que acciona el molino
- Peso y dimensiones de las bolas de acero.
- Transmisión por cadenas y eje de transmisión del molino

Simular el desempeño del diseño realizado, utilizando el Software CAD 3D SolidWorks; y establecer los planos de fabricación.

Realizar un balance masa y energía al caldero acuotubular TSX-G, en estado de mejora con molino de bolas, para determinar el aumento de la eficiencia energética del caldero.

Realizar un análisis económico, determinando: Beneficio, inversión en activos y retorno operacional de la inversión.

Determinar la viabilidad del proyecto mediante el análisis financiero VAN (Valor actual neto) y TIR (tasa interna de rentabilidad).

II. MÉTODO

2.1. Diseño de investigación

Pre-experimental.

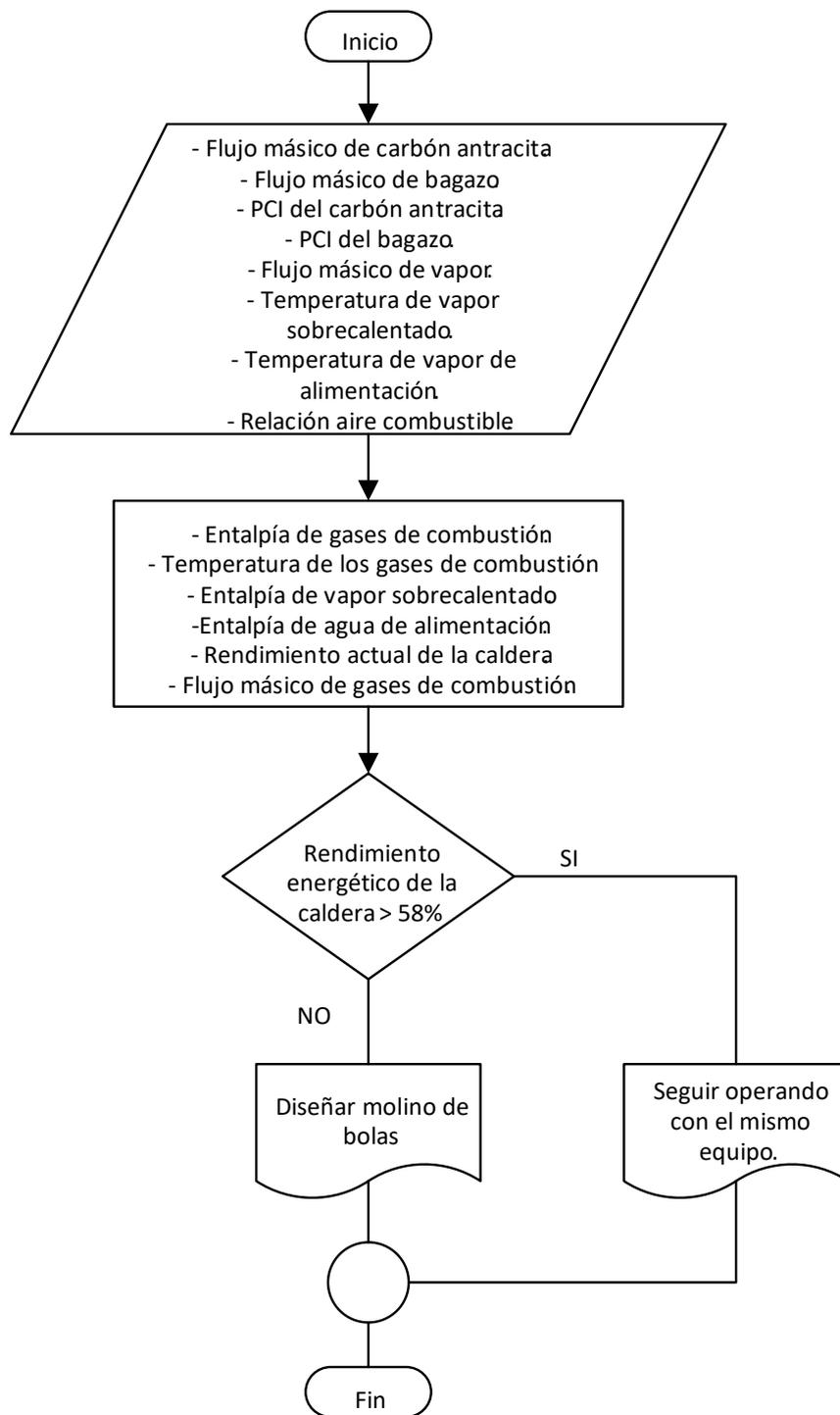


Figura 2.1, Diagrama de Flujo, para el diseño del molino de bolas. (parte 1)

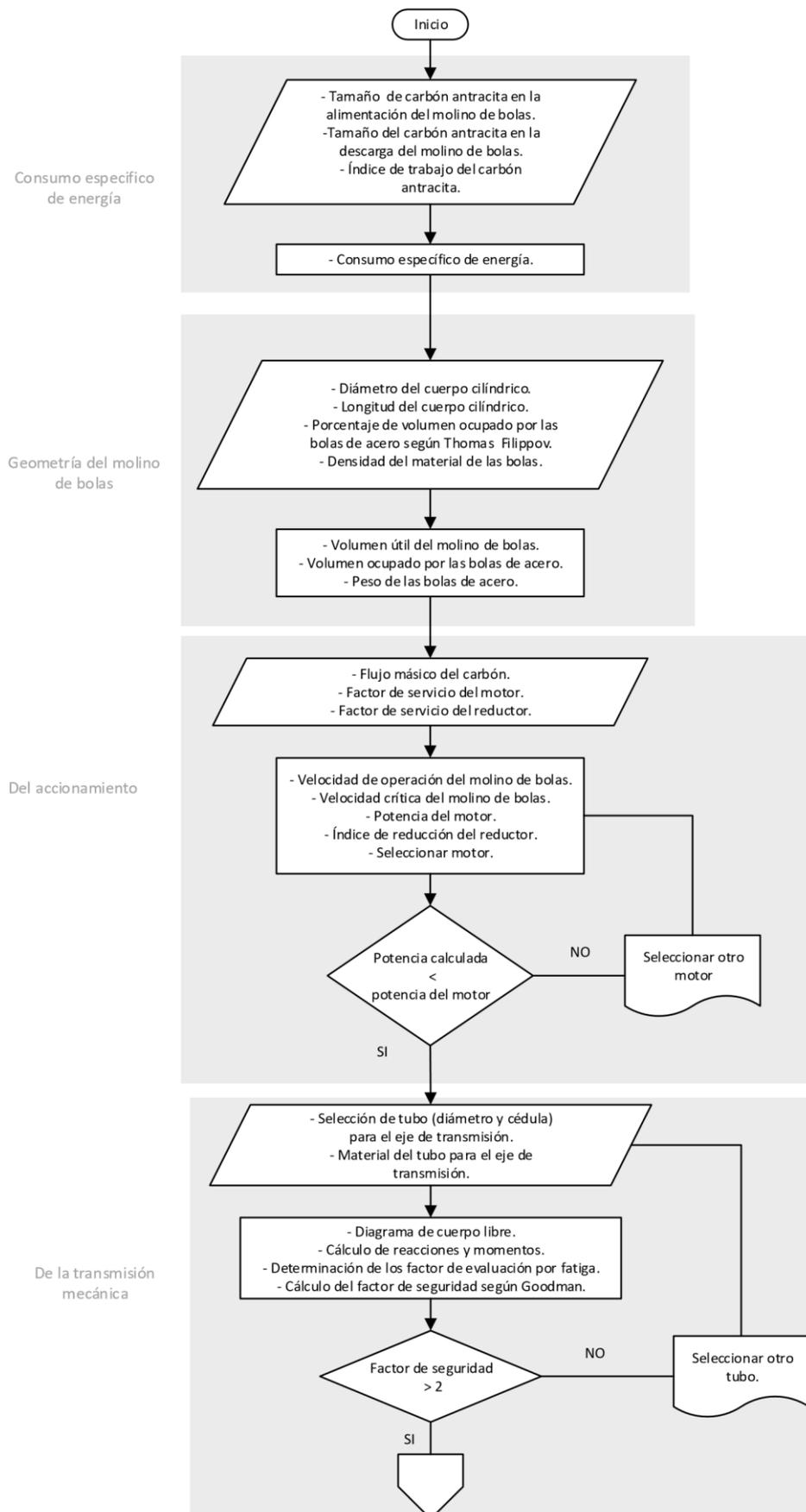


Figura 2.2, Diagrama de Flujo, para el diseño del molino de bolas. (parte 2)

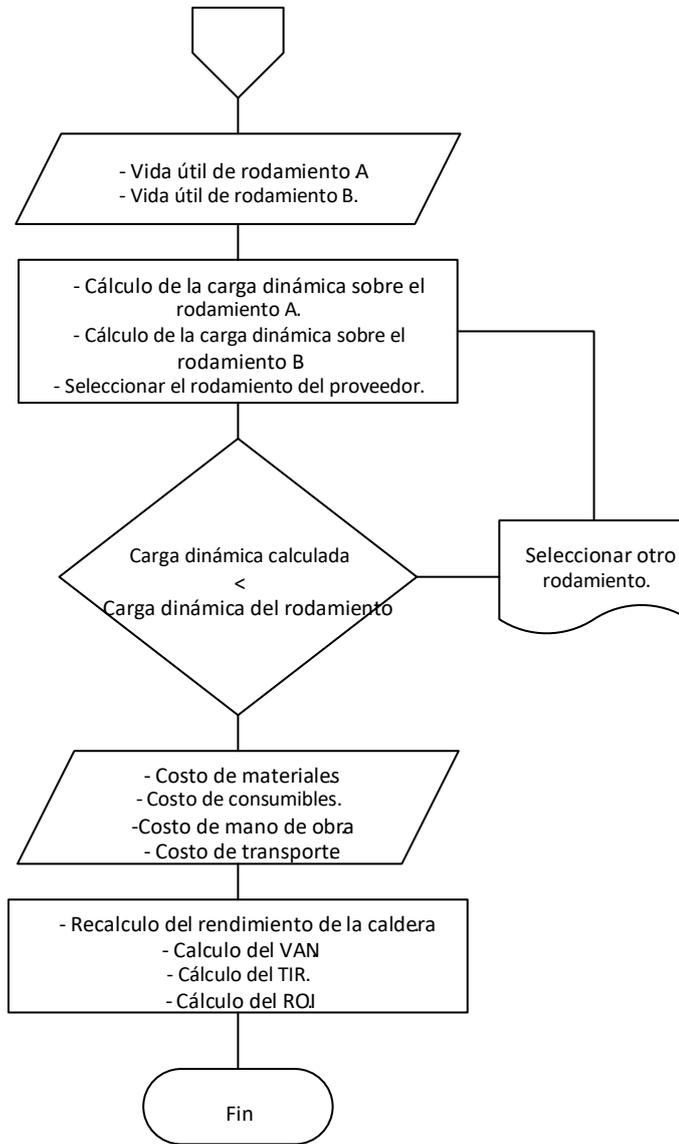


Figura 2.2, Diagrama de Flujo, para el diseño del molino de bolas. (parte 3)

2.2. Variables

2.2.1. Variables independientes

Flujo másico de carbón antracita (TM/h)

Consumo específico de energía (KWh/ton) Tamaño del carbón antracita (mm)

2.2.2. Variables dependientes

Capacidad de molienda máxima de salida de Carbón antracita (TM/h)

Potencia del motor (KW)

Longitud y diámetro del cuerpo cilíndrico del molino de bolas Velocidad de operación

2.3. Operacionalización de las variables

Tabla 2.3: Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador	Escala
Flujo másico de carbón antracita	Es la magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo.	Es el consumo de carbón antracita en condiciones reales actuales del caldero acuatubular.	Masa de carbón antracita.	0 – 12 TM/h	Cuantitativa (TM/h)
			Tiempo de alimentación.		
Consumo específico de energía	Se expresa como la potencia que consume en una hora, para obtener una tonelada de molienda.	Es el consumo necesario de energía para cumplir el objetivo de pulverizar el carbón antracita a niveles de micrón.	Potencia consumida.	0 – 13.81 KWh/TM	Cuantitativa (KWh/TM)
			Masa de carbón antracita.		
Tamaño del carbón antracita	Dimensión de una línea o de un cuerpo considerando	Es el tamaño máximo logrado después de la	Largo medio del carbón	0.1 – 75 mm	Cuantitativa (mm)
			Ancho medio del carbón		

	su extensión en línea recta.	trituration del carbón antracita en el molino de martillos.	Altura medio del carbón		
Capacidad de molienda máxima de Carbón antracita	Es la magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo.	Es el flujo másico de molienda de carbón antracita al cual será diseñado el molino de bolas	Flujo másico máximo de carbón antracita para pulverizar.	12000 Kg/h	Cuantitativa (Kg/h)
	Es la relación de paso de energía de	Es la potencia nominal máxima de	Torque del motor eléctrico	0 – 1327 Nm	Cuantitativa
Potencia del motor eléctrico	un flujo por unidad de tiempo.	diseño para poder dar movimiento rotatorio al molino.	Revoluciones por minuto del motor eléctrico.	0 – 109 RPM	(KW)
Beneficios económicos	Es un término utilizado para designar la ganancia que se obtiene de un proyecto o actividad económica.	Es el beneficio logrado debido a la mejora en la operación del caldero.	Retorno operacional de la inversión	0 – 9 (en 1 año)	Cuantitativa (U\$\$/año)
			Valor actual neto.	0 – 1,000,000 U\$\$	
			Tasa interna de rentabilidad.	0 – 14 %	
Inversión	Es el valor monetario de los consumos de factores que supone el ejercicio de una actividad económica destinada a la producción de un bien	Son los costos en los activos fijos tales como: motor, engranajes, cilindro, ejes, cojinetes, material de bolas, cimientos, pernos, soportes y mano de obra.	Costo de inversión de fabricar un molino de bolas para pulverizar carbón antracita.	0 – 30 000 U\$\$	Cuantitativa (U\$\$)

2.3. Población y muestra

2.3.1. Población:

Molinos de carbón para plantas Termoeléctricas (Cogeneradoras de energía térmica y eléctrica) con calderas con lecho fluidizado.

2.3.2. Muestra:

Molino de bolas con capacidad de 12 TM/h de carbón antracita para Planta Trupal S.A, con caldera TSX-G en lecho fluidizado.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 2.4, Técnicas e instrumentos del proyecto

Técnica	Instrumento
Análisis documental	Fichas de registro del control de operación de la caldera TSX-G.
Análisis documental	Fundamentos teóricos en cálculo estructural y en diseño de molino de bolas.

2.5. Métodos de análisis de datos

Primero, se determinará las entalpías de ingreso y salida de la caldera acuotubular TSX-G, tales como: Entalpia de combustible, aire, vapor sobrecalentado, agua de alimentación y poder calorífico inferior de la mezcla (Carbón antracita y médula de bagazo).

Segundo, a través de un balance de masa y energía al caldero en condiciones actuales con carbón triturado del molino de martillos, se determinará la temperatura de gases calientes y rendimiento energético.

Tercero, se establecerán diferentes elementos de máquinas o activos para generar tres tipos de molinos de bolas y seleccionar la opción más óptima para la molienda de carbón.

Cuarto, se dimensionarán y seleccionarán los elementos de máquinas; a través del uso cuantitativo de la ingeniería, permitiendo determinar: el Volumen y peso ocupado por las bolas dentro del molino; energía y potencia del molino; diámetro, longitud y espesor del cilindro; velocidad de rotación del molino; cojinetes y ejes; sistema de transmisión por cadena.

Quinto, se diseñará el molino de bolas, utilizando el Software CAD 3D SolidWorks.

Sexto, se comparará el rendimiento energético con molino de bolas.

Finalmente, se determinará la viabilidad del presente proyecto, a través del beneficio económico logrado por la mejora de la operación del caldero, inversión en todos los elementos involucrados en el diseño del molino de bolas y retorno operacional de la inversión inicial.

2.6. Aspectos éticos

Todo lo copiado de otra investigación se encuentra referenciado y lo que es aporte mío está referenciado como mi autoría.

III. RESULTADOS

3.1. Balance de masa y energía a la caldera acuotubular TSX-G en condiciones actuales con molino de martillo

a) Balance de masa y energía en el quemador:

Se establece un balance de masa y energía al quemador para determinar la temperatura de gases calientes de la mezcla (carbón antracita + médula de bagazo). Según la fórmula 1.2:

$$h_{GC} = \frac{\dot{m}_{\text{carbón antracita}} * PCI_{\text{carbón antracita}} + \dot{m}_{\text{médula bagazo}} * PCI_{\text{médula bagazo}}}{(1 + \text{Ratio}) * (\dot{m}_{\text{carbón antracita}} + \dot{m}_{\text{médula bagazo}})}$$

En la figura 3.1, se muestran los resultados obtenidos en la ficha de registro del caldero acuotubular, en referencia a datos para obtener la entalpía de gases calientes. (Anexo A.2 y A.4)

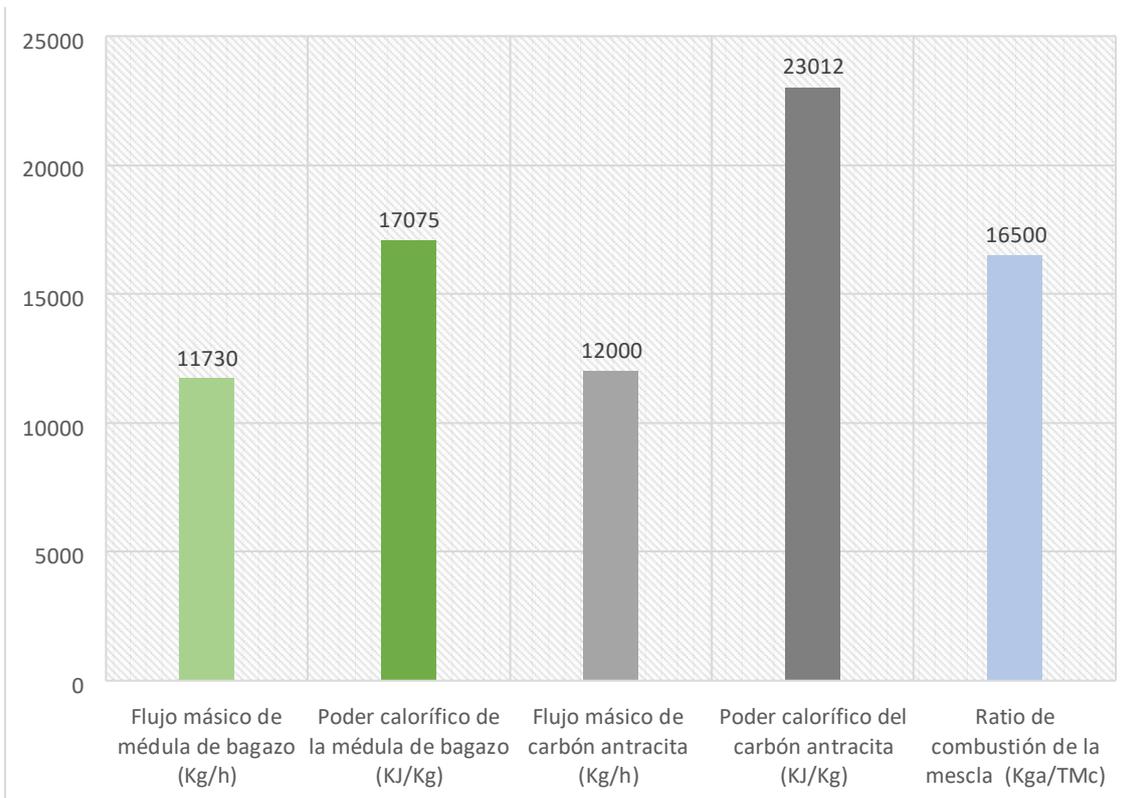


Figura 3.1, Parámetros de operación del caldero

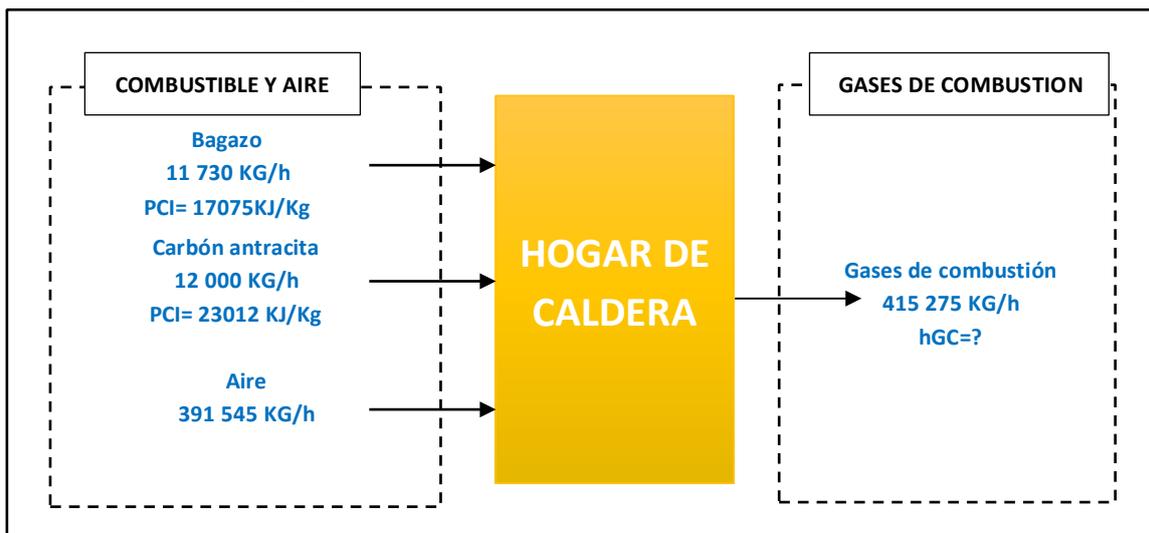


Figura 3.2, Parámetros de operación en el hogar de la caldera.

Reemplazando, la entalpia de los gases calientes resulta:

$$\begin{aligned}
 & \frac{12000\text{Kg}}{3600} \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \frac{1}{\text{kg}} * 23012 + \frac{11730\text{Kg}}{3600} \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \frac{1}{\text{kg}} * 17075 \\
 = & \frac{\left(1 + 16.5 \frac{\text{Kga}}{\text{Kgc}}\right) * \left(\frac{12000}{3600} + \frac{11730}{3600}\right) \frac{\text{Kg}}{\text{s}}}{\text{KJ}} \\
 & h_{GC} = 1147.27 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

La temperatura de los gases calientes en el hogar de la caldera, según el anexo A.3; sería:

$$T_{GC} = 1020^{\circ}\text{C}$$

b) Rendimiento energético actual del caldero acuotubular

Se determinará el rendimiento energético del caldero, bajo los parámetros actuales del caldero. Según la fórmula 1.2:

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{\dot{m}_{\text{vs}} * (h_{\text{vs}} - h_{\text{aa}})}{\dot{m}_{\text{carbón}} * \text{PCI}_{\text{carbón}} + \dot{m}_{\text{médula}} * \text{PCI}_{\text{médula}}}$$

actual
bagazo bagazo

En la figura 3.2, se muestran los resultados obtenidos en la ficha de registro del caldero acuotubular, en referencia a datos para obtener el rendimiento. (Anexo A.2 y A.4)

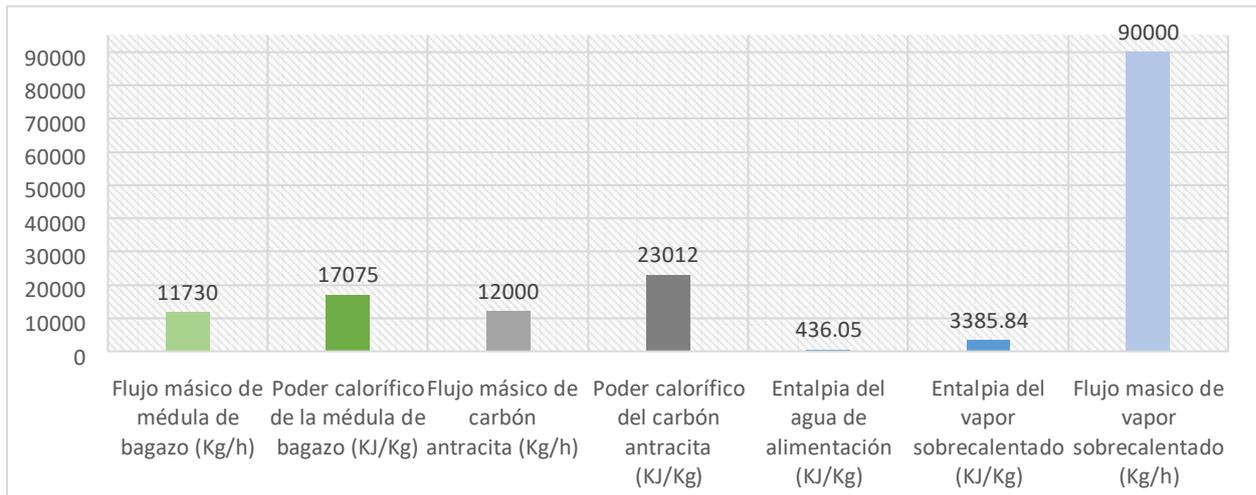


Figura 3.3, Parámetros de operación del caldero Reemplazando

el rendimiento energético actual, resultaría:

$$\eta_{\text{caldera actual}} = \frac{\frac{90000 \text{ Kg}}{3600 \text{ s}} * (3385.84 - 436.05) \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} + \frac{12000 \text{ Kg}}{3600 \text{ s}} * \frac{23012 \text{ KJ}}{\text{kg}} + \frac{11730 \text{ Kg}}{3600 \text{ s}} * \frac{17075 \text{ KJ}}{\text{kg}}}{\dots}$$

$$\eta_{\text{caldera actual}} = 0.5572 = 55.72\%$$

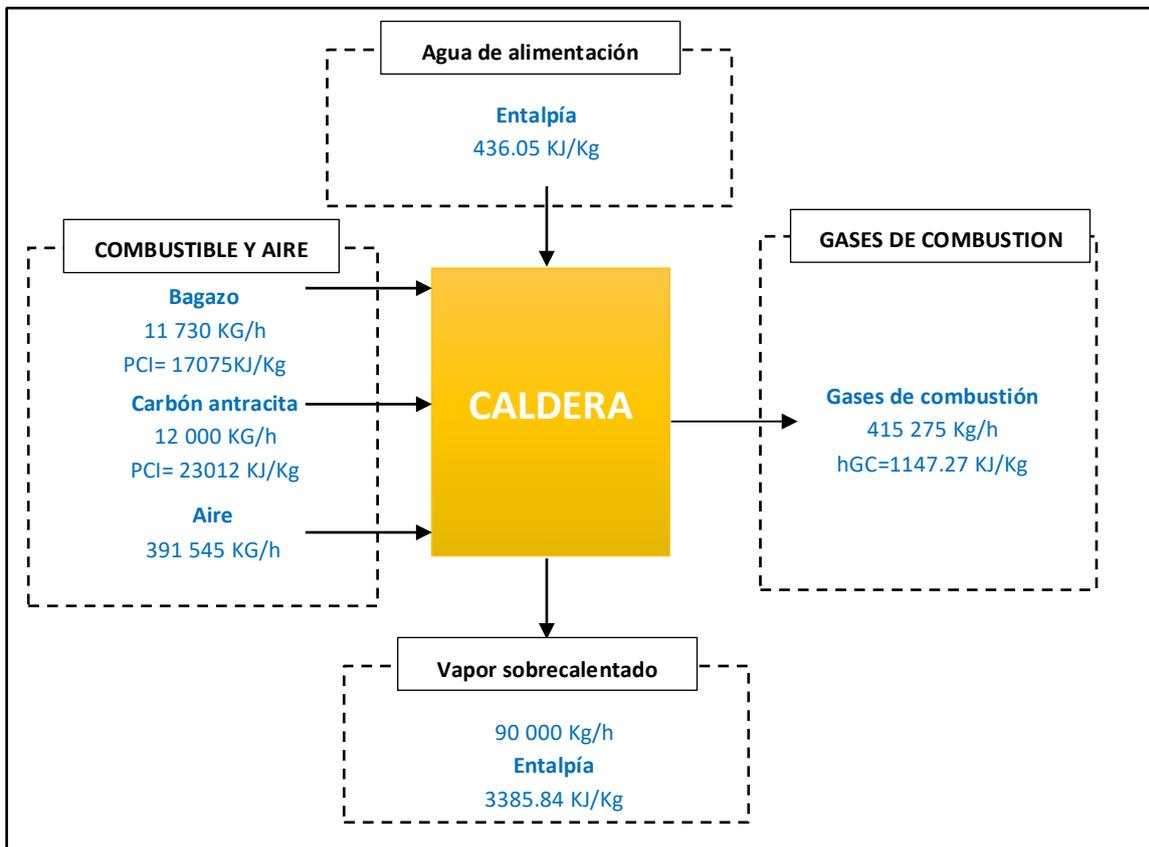


Figura 3.4, Parámetros de operación en el hogar de la caldera.

c) Flujos máxicos de combustible, aire y gases en operación actual del caldero:

- Flujo máxico de combustible total:

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = \dot{m}_{\text{carbón antracita}} + \dot{m}_{\text{médula total bagazo}}$$

$$\dot{m}_{\text{combustible}}^{\text{total}} = \frac{12000\text{Kg}}{3600 \text{ s}} + \frac{11730\text{Kg}}{3600 \text{ s}}$$

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = 6.59 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}^{\text{total}}$$

- Flujo máxico del aire de combustión:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{aire}} &= \dot{m}_{\text{combustible}}^{\text{total}} * \text{ratio} \\ &= 6.5917 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 16.50 \frac{\text{Kg - aire}}{\text{Kg - combustible}} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{\text{aire}} = 108.76 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Flujo másico de gases calientes o gases residuales:

$$\dot{m}_{\text{gases}} = \dot{m}_{\text{combustible}} * (\text{ratio} + 1)$$

$$\dot{m}_{\text{gases}} = 6.5917 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * (16.50 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg}} + 1)$$

$$\dot{m}_{\text{gases}} = 115.35 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

A continuación, se presenta tabla resumen de los resultados de la sección 3.

Tabla 3.1, Tabla resumen del balance de másico y de energía.

Ítem	Parámetro	Unidades	cantidad
01	Entalpía de los gases calientes	KJ/Kg	1147.27
02	Temperatura de gases calientes	° C	1020
03	Rendimiento energético de caldero chino	(%)	55.72
04	Flujo másico de combustible	Kg/s	6.59
05	Flujo másico de aire	Kg/s	108.76
06	Flujo másico de gases de combustión.	Kg/s	115.36

3.2. Tabla de características y especificación para el diseño del molino de bolas

El primer paso para empezar con el diseño del molino de bolas, es definir los requerimientos que debe cumplir la máquina, y según la prioridad de estos, los significativos se definen como exigencias y los menos prioritarios como deseos.

La lista mostrada en la tabla 3.2, indica las exigencias y deseos que se requieren en el diseño de esta máquina, esta lista fija la base sobre la cual se determinará el concepto de solución óptimo y toma en cuenta aspectos limitantes como costo de fabricación, tamaño, suministro de energía, entre otros.

Tabla 3.2: Lista de requerimientos.

LISTA DE REQUERIMIENTOS		Pág. 1 de 3
Proyecto:	Diseño de un molino de bolas con una capacidad de 12 t/h de molienda de carbón antracita	Fecha: 15/09/2016
Cliente:	EMPRESA TRUPAL S.A.	Elaborado: Junior Bazán Jiménez
Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
Exigencia	Función Principal: Molienda de carbón antracita, con una capacidad de 12000 Kilogramos por hora	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	Materia Prima: La materia prima es el carbón antracita que ingresará a la máquina proveniente de los molinos de martillo. Tamaño del carbón con molino de martillos: máximo: 75mm Tamaño del carbón con molino de bolas: 0.1 mm	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	Fuerza: La fuerza de impacto debe ser la necesaria para asegurar la pulverización del carbón, y su valor se cuantificará mediante el análisis matemático.	Junior Bazán Jiménez

Exigencia	<p>Seguridad: La máquina debe contar con equipos de protección eléctricos como interruptor termo-magnético que protejan a la máquina e interruptor diferencial que protejan al operador.</p>	Junior Bazán Jiménez
-----------	---	----------------------

LISTA DE REQUERIMIENTOS		Pág. 2 de 3
Proyecto:	Diseño de un molino de bolas con una capacidad de 12 t/h de molienda de carbón antracita	Fecha: 15/09/2016
Cliente:	EMPRESA TRUPAL S.A.	Elaborado: Junior Bazán Jiménez
Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
Exigencia	<p>Costos: El costo total del prototipo estimado no debe superar los U\$\$ 30 000</p>	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	<p>Señales: Contar con luces indicadoras de máquina en marcha y máquina parada.</p>	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	<p>Fabricación: La máquina debe ser diseñada para que pueda fabricarse en cualquier taller de fabricación con piezas disponibles en el mercado local.</p>	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	<p>Montaje: La máquina debe poseer la característica de poder ser ensamblada de manera rápida y segura.</p>	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	<p>Energía: El suministro de energía eléctrica es trifásico con una tensión de 440 Volts</p>	Junior Bazán Jiménez

Exigencia	Tamaño: Las dimensiones máximas de la máquina requeridas son:1000x1000 mm	Junior Bazán Jiménez
-----------	---	-------------------------

LISTA DE REQUERIMIENTOS		Pág. 3 de 3
Proyecto:	Diseño de un molino de bolas con una capacidad de 12 t/h de molienda de carbón antracita	Fecha: 15/09/2016
Cliente:	EMPRESA TRUPAL S.A.	Elaborado: Junior Bazán Jiménez
Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
Exigencia	Mantenimiento: Se priorizara fácil acceso a las partes que se desgastan (bolas) para que así sean cambiadas rápidamente.	Junior Bazán Jiménez
Exigencia	Limpieza: Luego de su uso, la limpieza debe ser una tarea fácil y rápida.	Junior Bazán Jiménez
Deseo	Automatización: Que la única tarea del usuario sea el control del tamaño del carbón.	Junior Bazán Jiménez

3.3. Estructura de funciones para generar tres conceptos del diseño de molino de bolas

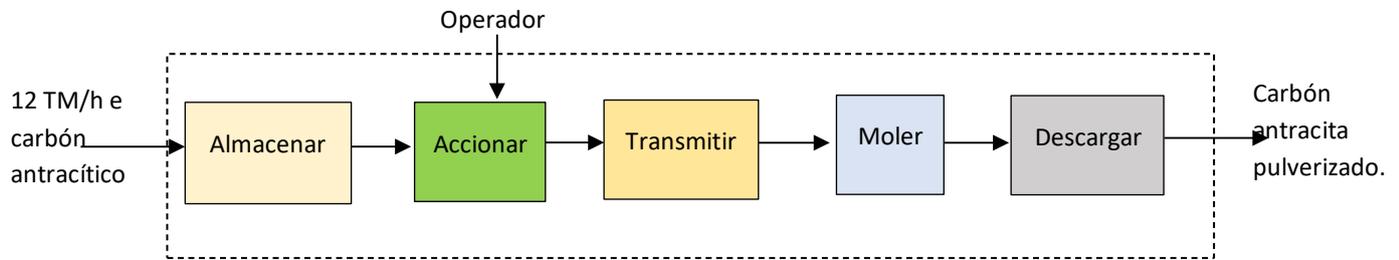


Tabla 3.2. Estructura de funciones

Almacenar	Consiste en tener una zona donde el carbón debe ser almacenado por un determinado tiempo.
Accionar	Consiste en recibir la energía mecánica proveniente del accionamiento antes mencionado y transmitirla hacia los mecanismos de corte.
Transmitir	Consiste en elementos de transmisión de potencia para reducir la velocidad de los elementos
Moler	Consiste en elementos para la demolición del tamaño del carbón antracita
Descargar	El producto será descargado de la máquina y llevado por medios de transportes

3.4. Caja negra

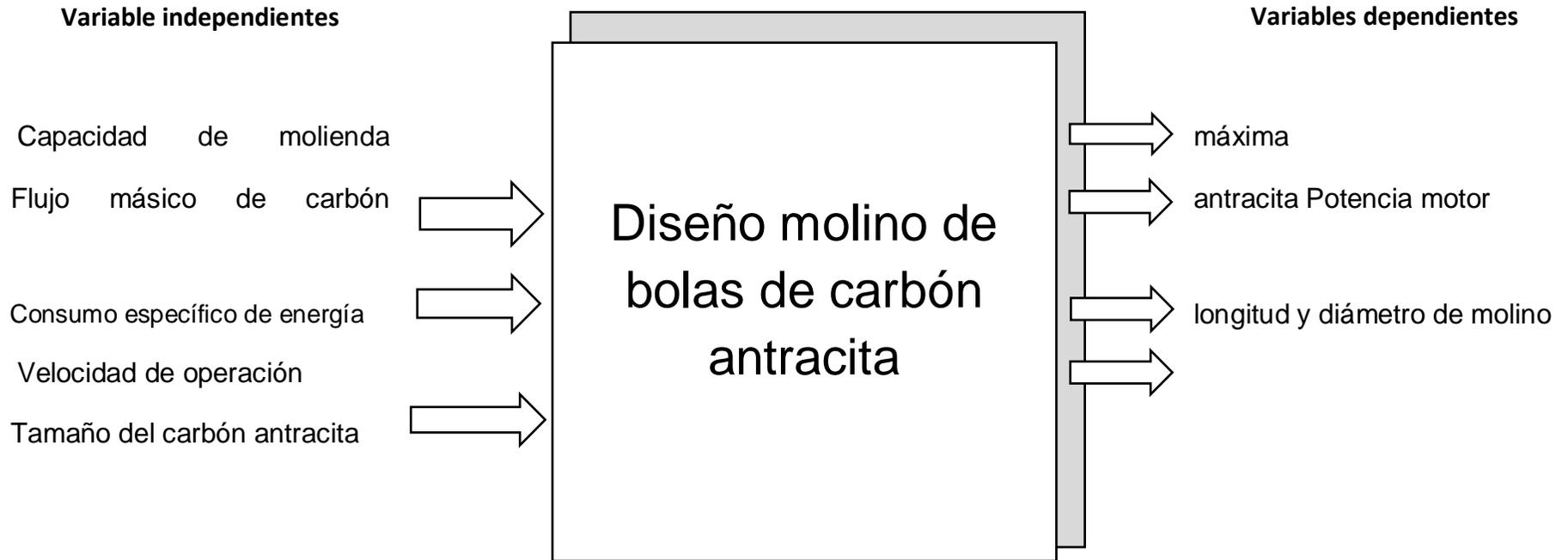
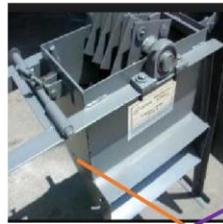
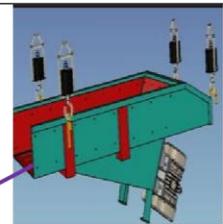
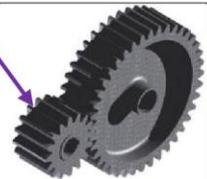


Figura 2.2: Caja negra del diseño

3.5. Matriz Morfológica:

Luego de obtener la estructura de funciones, a cada función se le ha asignado diferentes principios físicos que satisfagan dichas funciones y como resultado se obtiene la matriz morfológica, la cual se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3, Matriz Morfológica

Ítem	Función	Alternativa de solución 1	Alternativa de solución 2	Alternativa de solución 3
1	ALMACENAR			
2	ACCIONAR			
3	TRANSMITIR			
4	MOLER			
5	DESCARGAR			

Solución 1	
Solución 2	

3.6. Conceptos de evaluación

C.1) Concepto 01: Molino de bolas con accionamiento de cadena.

Este diseño cuenta con un motor eléctrico (1), el cual acciona un reductor de velocidad (2), el piñón (3) a través de cadena, transmite la velocidad requerida por el molino de bolas (4), el cual gira libremente a través de un eje hueco por el cual se evacua el mineral (5), con rodamiento para mantener el sistema estable (6) y estructuras de soporte (7).

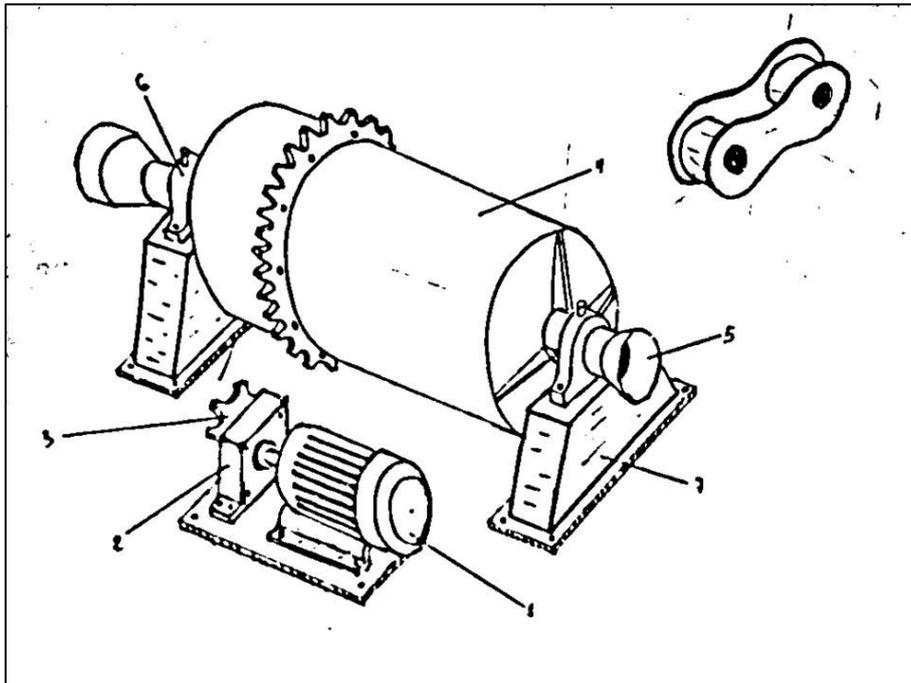


Figura 3.3, Molino de bolas con accionamiento de cadena.

C.2) Concepto 02: Molino de bolas con accionamiento de fajas

Se cuenta con el accionamiento primario de un motor eléctrico (1), el cual acciona la polea motriz (2), para dar movimiento al conjunto de fajas en V (3) a través de la polea (4), mueve el eje hueco de salida e ingreso del mineral (5 y 6), permitiendo el giro del molino (7) y cimientos de soporte (8).

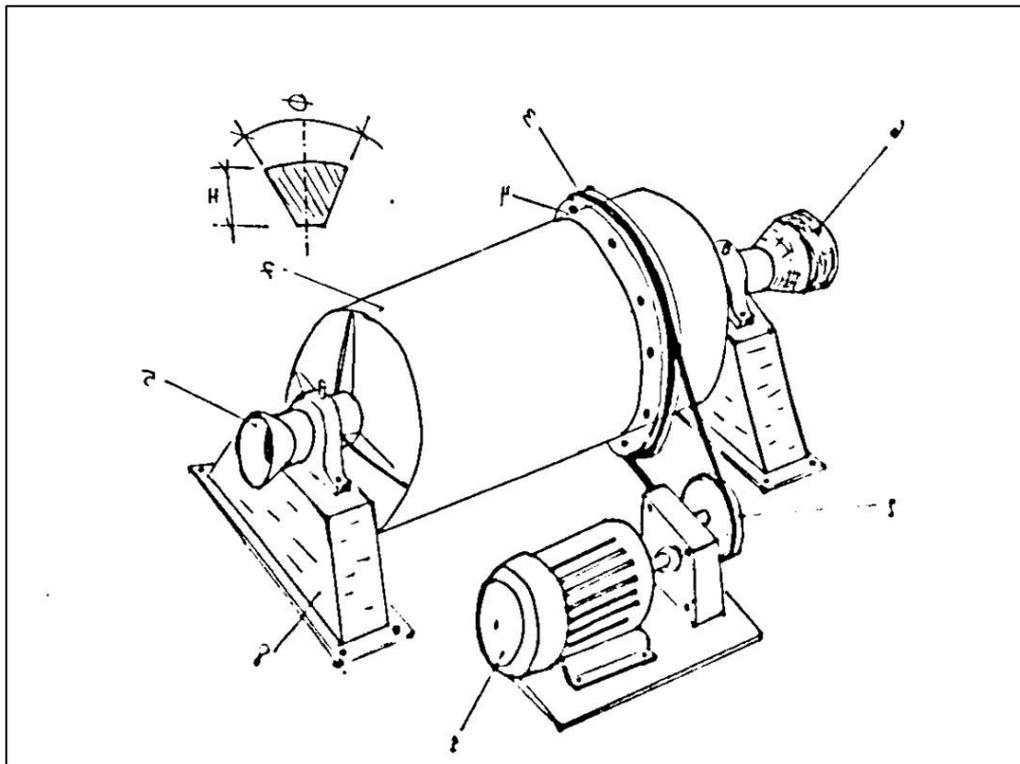


Figura 3.4, Molino de bolas con accionamiento de fajas en V.

C.3) Concepto 03: Molino de bolas con accionamiento de engranajes rectos

Este diseño cuenta con un motor eléctrico (1), el cual acciona el engranaje recto motriz (2), permitiendo el libre giro del engranaje conducido (3), quien le da la velocidad necesaria al cilindro (4), contando con cojinetes de bolas para mantener la estabilidad del sistema (5), ingresando y saliendo la molienda de forma horizontal (6) y con bases estructurales (7).

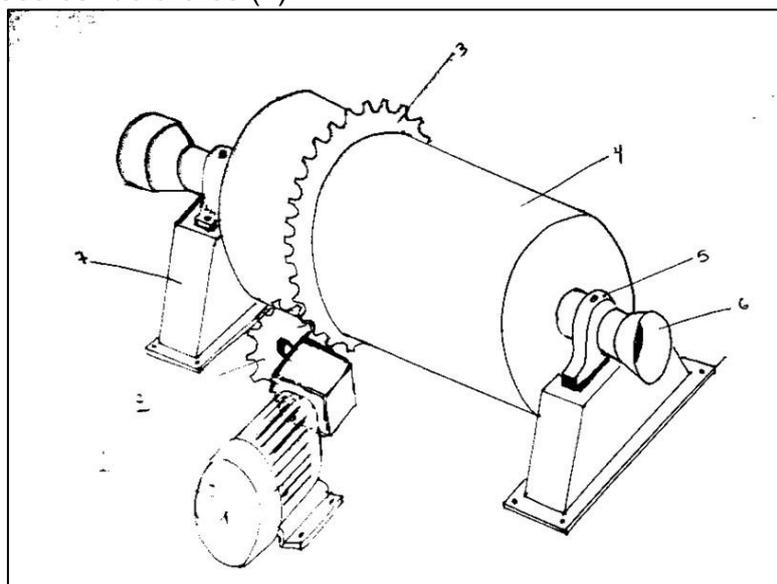


Figura 3.5, Molino de bolas con accionamiento con engranajes rectos

d) Evaluación técnico económica de los conceptos de solución Los conceptos de solución se sometieron a una evaluación técnico-económica según los criterios mostrados en la tabla 3.4

Tabla 3.4, Criterios técnicos y económicos de los conceptos

EVALUACION DE PROYECTOS valor técnico Xi					AREA DE DISEÑO					
PROYECTO: DISEÑO DE MOLINO DE BOLAS PARA CARBON ANTRACIA.										
Criterios técnicos de evaluación para diseños en fase de conceptos										
Variantes de Concepto/proyecto			S1		S2		S3		S ideal	
N°	Criterios de Evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Función	4	4	16	3	12	3	12	4	16
2	Forma	3	3	9	3	9	3	9	4	12
3	Diseño	4	3	12	2	12	4	16	4	16
4	Seguridad	4	4	16	2	12	4	16	4	16
5	Ergonomía	3	4	12	3	9	4	12	4	12
6	Fabricación	4	4	16	3	16	2	8	4	16
7	Montaje	4	4	16	4	16	3	12	4	16
8	Transporte	4	4	16	3	12	2	8	4	16
9	Uso	4	4	16	4	16	3	12	4	16
10	Mantenimiento	4	4	16	4	16	2	8	4	16
PUNTAJE MÁXIMO				145		130		113		152
VALOR TÉCNICO				0.95		0.85		0.74		1
ORDEN				1		3		4		

EVALUACION DE PROYECTOS			AREA DE DISEÑO								
valor técnico Yi											
PROYECTO: DISEÑO DE MOLINO DE BOLAS PARA CARBON ANTRACIA.											
Criterios económicos de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos											
Variantes		de		S1		S2		S3		S ideal	
Concepto/proyecto											
Nº	Criterios de Evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	Gp	
1	Diseño	4	4	16	3	12	3	12	4	16	
2	Fabricación	4	3	12	2	12	3	12	4	16	
3	Transporte	4	4	16	3	12	4	16	4	16	
4	Mantenimiento	4	4	16	3	12	3	12	4	16	
5	Costos	4	4	16	3	12	3	12	4	16	
6	Plazos	4	3	12	3	12	3	12	4	16	
PUNTAJE MÁXIMO				88		72		76		96	
VALOR TÉCNICO				0.91		0.75		0.8		1	
ORDEN				1		4		3			

El puntaje de cada criterio se dio en base a la tabla 3.5

Tabla 3.5, Puntaje de evaluación de los conceptos VDI 2225

Descripción	Puntaje
No aceptable	0
Poco satisfactorio	1

Suficiente	2
Bien	3
Ideal	4

La solución que obtuvo mayor puntuación, es aquella cuyas características técnicas y económicas son las más apropiadas para la aplicación, en este caso es el Proyecto Preliminar 1 (**S1**),

Dónde Valor técnico:

$$X_i, Y_i = \frac{p_1 + p_2 + p_3 \dots p_n}{n p_{max}} \quad (\text{Según norma VDI 2225})$$

Tabla 3.6, Resultados obtenidos Xi y Yi

SOLUCION	VALOR TECNICO DE X	VALOR ECONOMICO DE Y
SOLUCION 1	0.95	0.91
SOLUCION 2	0.87	0.83
SOLUCION 3	0.85	0.8

3.7. Diseño del molino de bolas

3.7.1. Determinación del consumo específico de energía con molino de bolas

Según la tercera ley de bond expresada en la formula (1.2), el consumo específico, que tendría el molino de bolas sería:

$$E = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{X_2}} - \frac{10}{\sqrt{X_1}} \right)$$

Datos a reemplazar:

- Índice de Trabajo del material: El material a pulverizar es carbón antracita, por lo tanto, de la tabla 1.1, se tiene:

$$W_i = 13 \frac{\text{KWh}}{\text{ton.corta}}$$

- Tamaño pasante en la alimentación:

El tamaño de alimentación del molino de bolas, será el tamaño máximo del carbón entregado por el molino de martillos.

$$X_1 = 75 \text{ mm} = 75000\mu\text{m}$$

- Tamaño pasante del producto:

Es el tamaño de pulverización de carbón entregado por el molino de bolas, el cual será consumido por el caldero acuotubular, según el tamaño de pulverización para la aplicación exacta de la tercera ley de bond, elegiremos el tamaño de pulverización de:

$$X_2 = 100 \mu\text{m} = 0.1\text{mm}$$

Reemplazando, tenemos:

$$E = 13 \frac{\text{KWh}}{\text{ton.corta}} \left(\frac{10}{\sqrt{100 \mu\text{m}}} - \frac{10}{\sqrt{75000\mu\text{m}}} \right) \quad 10$$

ton.corta

$$E = 12.525 \frac{\text{KWh}}{\text{ton.corta}}$$

En TM (toneladas métricas) seria: (1TM=1.10231 ton. Corta)

$$E = 12.525 \frac{\text{KWh}}{\text{ton.corta}} \frac{1.10231 \text{ ton. Corta}}{1\text{TM}} *$$

$$E = 13.81 \frac{\text{KWh}}{\text{TM}}$$

3.7.2. Evaluación de la geometría del molino de bolas

Requisitos para el diseño del molino

Según la tabla 3.1, de lista de requerimientos las dimensiones exigidas para el diseño del molino de bolas son:

- Diámetro interior del molino de bolas:

$$D = 1\text{m} = 3.28084 \text{ pies}$$

En pies, seria: (1pie=0.3048m)

$$D = 3.28084 \text{ pies}$$

- Longitud del molino de bolas:

$$L = 1\text{m} = 3.28084 \text{ pies}$$

Los valores correspondientes a la longitud y diámetro, son valores impuestos por el diseñador y requisitos principales como variables de ingreso para el diseño de un molino de bolas. Sin embargo, se deberá evaluar si el espacio es suficiente para la capacidad de carbón que se pretende pulverizar.

Volumen total útil del molino de bolas

El volumen del carbón, se determinará, según la ecuación 1.7, que no es más que la ecuación del volumen de un cilindro.

$$V_t = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

Datos a reemplazar:

- Longitud del molino

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

- Diámetro interior del molino

$$D = 1\text{m}$$

Reemplazando, obtenemos:

$$V_t = \frac{\pi * (1\text{m})^2}{4} * (1\text{m})$$

$$V_t = 0.7854 \text{ m}^3$$

Volumen ocupado por las bolas dentro del molino:

Según la ecuación 1.8, porcentaje de volumen ocupado por las bolas de acero serian.

$$V_p = 113 - 126 \frac{H}{D}$$

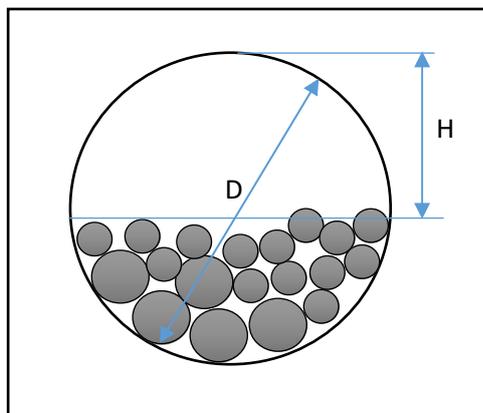


Figura 3.6, Altura libre por encima del nivel de llenado de las bolas.

En este caso, según trabajos previos realizados en molinos de bolas, en promedio siempre se sugiere que el porcentaje de llenado de las bolas de acero sea el 45% del volumen total (Thomas & Filippov, 1999)

Es decir, determinaremos la distancia de la parte superior a la superficie nivelada, obteniendo:

$$0.45 = 113 - 126 - 1$$

$$H = 0.9 \text{ m}$$

Según la ecuación 1.9, el volumen ocupado por las bolas sería:

$$V_b = V_p * V_t$$

Datos a reemplazar:

- Porcentaje de llenado de las bolas:

$$V_p = 0.45$$

- Volumen total:

$$V_t = 0.7854 \text{ m}^3$$

Reemplazando los datos:

$$V_b = 0.45 * 0.7854 \text{ m}^3$$

$$V_b = 0.35343 \text{ m}^3$$

Peso de las bolas

El peso neto o tal de las bolas en el molino, según la ecuación 1.10, sería:

$$W_b = (1 - p) * \rho_b * V_b$$

Datos a reemplazar:

- Porosidad, para un molino de bolas [6].

$$p = 0.48$$

- Volumen ocupado por las bolas:

$$V_b = 0.35343 \text{ m}^3$$

- Densidad de las bolas de acero:

El material de las bolas es de acero al carbono, el cual tienen un peso específico de

$\gamma = 76.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$ (Anexo A.7), es decir la densidad, sería:

m

$$\gamma = \rho_b * g$$

La gravedad promedio es: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Reemplazando:

$$76500 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = \rho_b * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\rho_b = 7798.165 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 7.8 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3}$$

El peso de las bolas sería:

$$W_b = (1 - 0.48) * 7.8 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3} * 0.35343 \text{ m}^3$$

$$W_b = 1.434 \text{ TM} = 1434 \text{ Kg}$$

3.7.3. Cálculo de la potencia del motor

De la formulación (1.3), tenemos:

$$P_M * * = 1.341 \frac{\text{E}}{\dot{m}_{\text{carbón antracita}}}$$

Datos a reemplazar:

- Consumo específico de energía

$$E = 13.81 \frac{\text{KWh}}{\text{TM}}$$

- Flujo de carbón: Es la producción máxima de carbón consumida por el caldero acuatubular.

$$\dot{m}_{\text{carbón}} = 12 \frac{\text{TM}}{\text{antracita h}}$$

Reemplazando:

$$P_M = 1.341 * 13.81 \frac{\text{KWh}}{1\text{TM}} * 12 \frac{\text{TM}}{\text{h}}$$

$$P_M = 222.23 \text{ HP}$$

En KW, seria: (1HP=0.746W)

$$P_M = 222.23 \text{ HP} * \frac{0.746 \text{ KW}}{1\text{HP}}$$

$$P_M = 165.78 \text{ KW}$$

La potencia del motor eléctrico que accionará al molino de bolas debe funcionar a un 80% de su capacidad nominal; por lo tanto, se debe considerar un factor de servicio igual a 1.20.

$$P_{\text{nominal}} = P_M * 1.20 = 165.78 * 1.20 = 198.94 \text{ KW} \approx 200 \text{ KW}$$

Del catálogo del proveedor de motores eléctricos SIEMENS, seleccionamos el motor asíncrono 315L, con una potencia de 200 KW con 4 polos, superior a la potencia de operación, debido a la existencia de pérdidas por transmisión de potencia. (Ver Anexo A.5)

Entonces el factor de servicio en operación:

$$F_{servicio} = \frac{200}{165.78} = 1.21$$

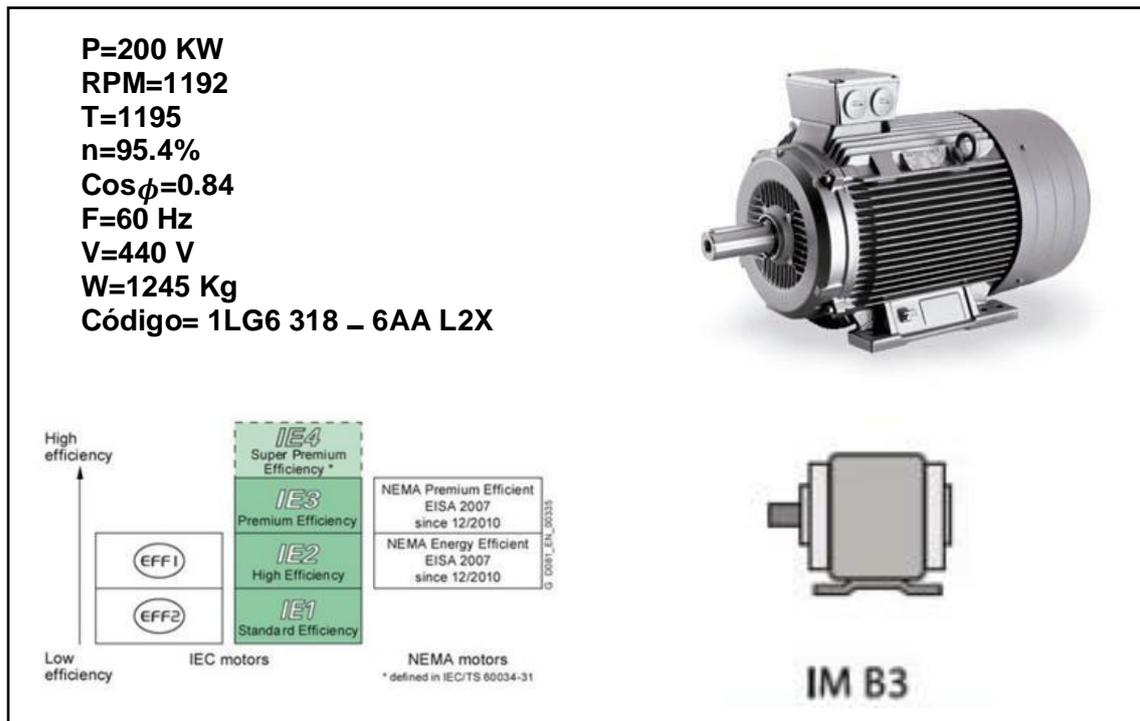


Figura 3.7: Motor eléctrico de accionamiento del molino de bolas [9].

El motor eléctrico seleccionado, entrega 1195 RPM, esta velocidad es muy alta por lo tanto es necesario equipar el motor con un reductor de engranes cónicos helicoidales.

Primero se determina la relación de transmisión que se desea, según la velocidad que se desea a la salida del reductor.

$$i_s = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1195 \text{ RPM}}{109 \text{ RPM}} = 11.2$$

Luego se debe determinar los factores f_1 (factor empírico según el tipo de máquina que va accionar) y f_2 (factor empírico según la máquina que accionará el reductor). Siemens presenta 2 tablas donde se puede encontrar estos dos factores. (Anexo A.6). Se considera que el reductor tendrá hasta 50 cargas pico por hora.

$$f_1 = 2.5, \quad f_2 = 1, \quad f_3 = 0.65$$

Entonces la potencia nominal del reductor es igual a la potencia nominal del motor multiplicada por los factores empíricos antes mencionados.

$$P_{2N} = P_{nominal} * f_1 * f_2 = 165 * 2.5 * 1 = 396 \text{ KW}$$

Se evalúa la potencia para la condición de torque máximo y asumiendo 50 cargas pico por hora.

$$P_{2N} \text{ KW} \geq \frac{T_{m\acute{a}x} * n_1}{9550} * f_3 = \frac{1327 * 1195}{9550} * 0.65 = 108$$

Technical specifications

Nominal power ratings P_{2N} (kW) type H2

i_N	n_1	n_2	Gear unit sizes										
			504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514
6.3	1800	286	208	343	-	648	-	1084	-	1851	-	3037	-
	1500	238	173	286	-	540	-	903	-	1543	-	2531	-
	1200	190	138	229	-	432	-	723	-	1234	-	2024	-
	1000	159	115	191	-	360	-	602	-	1028	-	1687	-
7.1	1800	254	184	311	-	585	-	982	-	1672	-	2733	-
	1500	211	153	259	-	487	-	818	-	1393	-	2277	-
11.2	1800	161	122	195	272	358	480	602	796	1064	1393	1708	2118
	1500	134	101	163	227	298	400	502	664	887	1160	1424	1765
	1200	107	81	130	182	239	320	401	531	709	928	1139	1412
	1000	89	68	109	151	199	267	334	442	591	774	949	1177
12.5	1800	144	104	175	247	320	429	531	710	924	1241	1518	1879
	1500	120	87	145	206	267	358	443	592	770	1034	1265	1565
	1200	96	70	116	165	213	286	354	473	616	827	1012	1252
	1000	80	58	97	137	178	238	295	394	513	689	844	1044

Tabla 3.7, Reductor Siemens.

De este modo identificamos que el reductor es el 509 tipo H2 con relación de reducción de 11.2 con factor de servicio igual a 2.4. Las dimensiones se muestran también en el anexo 6.

Cálculo de la velocidad adecuada del molino:

De la formulación (1.5), tenemos:

$$N_o = 56 - 40 \text{ Log } D$$

Dato a reemplazar:

- Diámetro interior del molino de bolas: $D = 3.28084$ pies

Reemplazando:

$$N_o = 56 - 40 \text{ Log } (3.28084 \text{ pies})$$

$$N_o = 35.36 \text{ rpm}$$

Calculo de la velocidad crítica del molino:

De la formulación (1.6), tenemos:

$$76.6$$

$N_c = D^{1/2}$ Tenemos:

$$N_c = \frac{76.6}{(3.28084 \text{ pies})^{1/2}}$$

$$N_c = 42.3 \text{ rpm}$$

3.7.4. Cálculo del % de velocidad crítica a la que debe operar el molino:

Según la ecuación 1.11, la velocidad crítica, sería:

$$C_s = 100 * \left[\frac{N_o}{N_c} \right]$$

Datos a reemplazar:

- Velocidad adecuada del molino

$$N_o = 35.36 \text{ rpm}$$

- Velocidad crítica del molino

$$N_c = 42.3 \text{ rpm}$$

Remplazando:

$$C_s = 100 \left[\frac{35.36 \text{ rpm}}{42.3 \text{ rpm}} \right]$$

$$C_s = 83.60\%$$

3.7.5. Tamaño máximo de las bolas de acero

El tamaño máximo para el cumplimiento del tamizado, se determinada según la ecuación 1.12:

$$B = \frac{\sqrt{X_1 * W_i} \sqrt{S}}{210 * C_s} D$$

Datos a reemplazar:

- Tamaño 80% pasante en la alimentación

$$X_1 = 75000 \mu\text{m}$$

- Índice de Trabajo de Bond, indicador de la Tenacidad del mineral, (KWh/ton. corta)

$$W_i = 13 \frac{\text{KWh}}{\text{ton.corta}}$$

- Porcentaje de velocidad crítica del molino (%)

$$C_s = 83.60\%$$

- Diámetro interior del molino (pies)

$$D = 3.28084 \text{ pies}$$

- Densidad del material a moler

El carbón antracita tiene una densidad promedio de 0.86 TM/m³(Anexo A.8)

$$S = 0.86 \text{ TM/m}^3 \text{ Reemplazar:}$$

$$B = \sqrt{\frac{75000 * 13}{210 * 83.60} \sqrt{\frac{0.86}{3.28084}}}$$

$$B = 5.33 \text{ pulg}$$

Se recomienda el tamaño más próximo inferior comercial, por lo tanto, el tamaño máximo a cargarse al molino será 5 pulg.

Distribución del tamaño de las bolas en el molino

La distribución del tamaño de las bolas en el molino, se detallan en la siguiente tabla 3.8, (Thomas y Filippov, 1999).

Tabla 3.8, Distribución de tamaños de las bolas de acero

Diámetro de las bolas (Pulgadas)	% de distribución	Peso (Kg)
5	35	501.9
4	30	430.2
3	20	286.8
2	15	215.1
14	100%	1434 Kg

3.7.6. Volumen de carbón pulverizado por cada revolución

Se sabe que se debe pulverizar 12 TM/h, y que la densidad aproximada a granel del carbón antracita es de 0.86 g/cm³.

$$\text{Flujo volumétrico} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{12000 \text{ Kg}}{0.86} = 0.2325 \text{ m}^3$$

$$\text{min } 860 \text{Kg} \cdot \text{m}^3 * 60 \quad \text{min}$$

Considerando la velocidad de operación del molino de bolas, se tiene que el volumen disponible en minuto para cubrir la capacidad de moliendo para alimentar la caldera, es:

$$\text{volumen de carbón por revolución} = \frac{0.2325 \text{ m}^3}{35.36 \text{ rev}} = 0.0066 \frac{\text{m}^3}{\text{rev}}$$

Esta la capacidad de carbón que se pulveriza por cada revolución del molino de bolas.

El espacio ocupado por las bolas, es:

$$\text{Volumen ocupado por la bolas} = 0.353 \frac{\text{m}^3}{\text{rev}}$$

Espacio disponible en el interior del molino de bola:

$$\text{Volumen del molino de bolas} = 0.785 \text{ m}^3$$

El volumen libre, sería: 0.425 m^3

3.7.7. Análisis al sistema de transmisión de potencia

En la figura 3.9, se muestra el esquema del sistema de transmisión por cadenas, donde la catalina motriz, recibe la velocidad de rotación entregada por un reductor de velocidad para luego reducirla a la velocidad deseada o adecuada del cilindro.

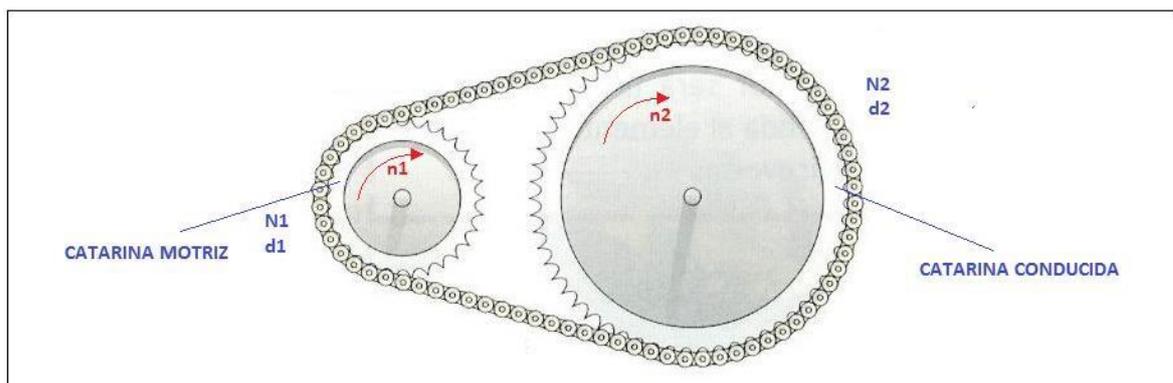


Figura 3.9, Transmisión por cadena de rodillos.

Determinación del número de cadena y número de torones:

Para que el diseño del molino de bolas sea compacto, se igualaran las potencias de diseño y permisible. Cabe mencionar que el diseño contempla el hecho de que el

cambio de cadena se realizará cada 15000 horas como parte de mantenimiento preventivo.

Potencia de diseño:

$$H_d = K_s * n_d * H_{\text{motor}}$$

nominal Potencia permitida por la cadena:

$$H_a = K_1 * K_2 * H_{\text{tab}}$$

Igualamos:

$$K_s * n_d * H_{\text{motor}} = K_1 * K_2 * H_{\text{tab}}$$

nominal Despejando la potencia tabulada:

$$H_{\text{tab}} = \frac{K_s * n_d * H_{\text{motor}}}{K_1 * K_2}$$

Donde:

K_s : El factor de servicio para impacto pesado: $K_s = 1.5$ (Anexo A.9) n_d :

Factor de diseño: $n_d = 1.3$

H_{motor} : Potencia nominal del motor: $H_{\text{motor}} = 268$ HP
nominal nominal

K_1 : Factor de corrección por número de dientes: $K_1 = 1$ (Anexo A.10), (Para 17 dientes, valor recomendado, por la metodología ("**Shigley, 2008**")

K_2 : Factor de corrección por número de torones: $K_2 = 1; 1.7; 2.5; 3.3; 3.9; 4.6; 6$ (Anexo A.11)

Reemplazando, tendríamos la siguiente ecuación:

$$H_{\text{tab}} = \frac{1.3 * 1.5 * 268}{1 * K_2}$$

$$H_{\text{tab}} = \frac{522.6}{K_2}$$

A continuación, se formula la siguiente tabla 3.9:

Tabla 3.9: Evaluación del número de cadena ANSI (tabla 17-20) y el número de torones a la velocidad de la catarina motriz de 109 RPM

Número de torones	$H_{tab} = \frac{579.15}{K_2}$ (Anexo A.11)	Número de cadena (Anexo A.12)	Tipo de lubricación
1	$\frac{522.6}{1} = 522.6$	N.C	
2	$\frac{522.6}{1.7} = 307.41$	N.C	
3	$\frac{522.6}{2.5} = 209.04$	N.C	
4	$\frac{522.6}{3.3} = 158.36$	240	B (Lubricación por baño o disco)
5	$\frac{522.6}{3.9} = 134.00$	240	B (Lubricación por baño o disco)
6	$\frac{522.6}{4.6} = 113.61$	240	B (Lubricación por baño o disco)
8	$\frac{522.6}{6} = 87.10$	200	B (Lubricación por baño o disco)

Comentario: según la tabla 3.9, seleccionamos una cadena de rodillos ANSI 240, con 4 torones.

Determinación del número de dientes de la catalina conducida:

$$n_1 * N_1 = n_2 * N_2$$

Datos:

n_1 : Velocidad de rotación de la catarina motriz, $n_1 = 109$ RPM (Velocidad entregada por el reductor)

N_1 : Número de dientes de la catarina motriz, $N_1 = 17$ (Valor recomendado, por la metodología (“**Shigley, 2008**”)) n_2 : Velocidad de operación estable del molino de bolas, $n_2 = 35.36$ RPM

Reemplazando:

$$109 * 17 = 35.36 * N_2$$

$$N_2 = 52.4 \approx 52$$

Determinación del diámetro de paso de las catarinas: -

Diámetro de paso de la catarina Motriz

$$d_1 = \frac{p}{3} \text{sen}(180/N_1)$$

Donde:

p: paso de la cadena, para la cadena seleccionada ANSI 240, p= 3 pulg. (Anexo A.13)

$$d_1 = \frac{3}{\text{sen}(180/17)} d_1 = 16.33 \text{ pulg}$$

- Diámetro de paso de la catarina conducida:

$$d_2 = \frac{p}{3} \text{sen}(180/N_2)$$

$$d_2 = \frac{3}{\text{sen}(180/52)} d_2 = 49.69 \text{ pulg}$$

En la figura 3.10, se muestran los resultados de la cadena de rodillos ANSI 240 de 4 torones

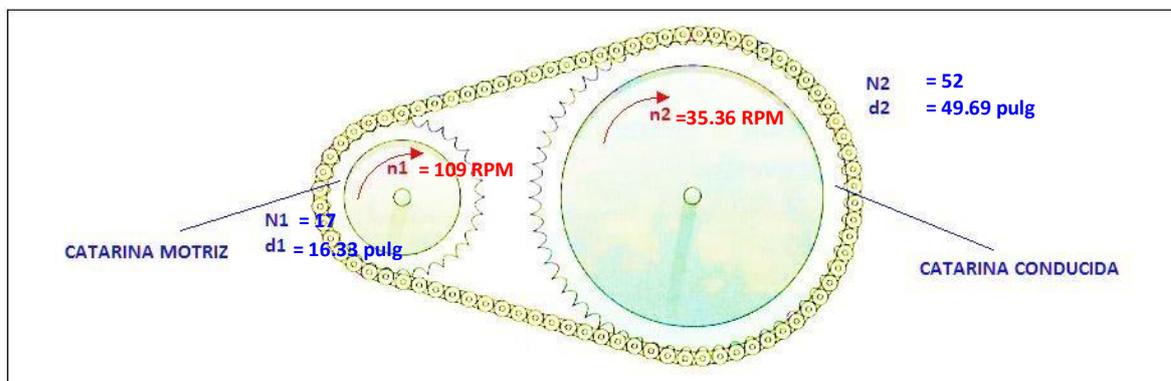


Figura 3.10, Parámetros de la cadena de rodillos seleccionada.

Longitud de la cadena:

$$L = n_d * \pi * (d_1 + d_2)$$

Datos:

- Factor de diseño, $n_d = 1.1$

- Diámetro de la catarina motriz: $d_1 = 16.33$ pulg - Diámetro de la catarina conducida:

$$d_2 = 49.69 \text{ pulg}$$

Reemplazando:

$$L = 1.1 * \pi * (16.33 + 49.69) \text{ pulg}$$

$$L = 228.15 \text{ pulg}$$

La longitud entre pasos, seria:

$$\frac{L}{p} = \frac{228.15 \text{ pulg}}{3 \text{ pulg}} = 75.05 \text{ pasos}$$

La distancia entre centros, se determina:

$$C = \frac{p}{4} \left[-A + \sqrt{A^2 - 8 * \left(\frac{N_2 - N_1}{2 * \pi} \right)^2} \right]$$

Donde:

$$A = \frac{N_1 + N_2}{2} - \frac{L}{p}$$

$$A = \frac{17 + 52}{2} - 75.05 = -40.55$$

Reemplazando:

$$C = \frac{3}{4} \left[-(-40.55) + \sqrt{(-40.55)^2 - 8 * \left(\frac{52 - 17}{2 * \pi} \right)^2} \right]$$

$$C = 58.44 \text{ pulg} = 1486.60 \text{ m}$$

Recalculando la longitud de paso de la cadena:

$$p = \frac{L}{\frac{2 * C}{p} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4 * \pi^2 * C}}$$

$$L = \frac{2 * 58.44}{3} + \frac{17 + 52}{2} + \frac{(52 - 17)^2}{4 * \pi^2 * 58.44} = 78.46$$

p

$$\frac{L}{p} = 78.46 \text{ pasos}$$

La longitud de la cadena, sería: $L=78*3=234\text{pulg} = 5943.6 \text{ mm}$.

Criterio de la distancia entre centros:

La distancia entre centros, se encuentra en el rango de diseño, es decir:

$$d_2 < C < 3(d_1 + d_2)$$

$$49.69 \text{ pulg} < 58.44 \text{ pulg} < 3(16.33 + 49.69)\text{pulg}$$

$$50.53 \text{ pulg} < 58.44 \text{ pulg} < 198.06 \text{ pulg}$$

Ángulo de contacto:

$$\theta_d = \pi - 2 \sin^{-1} \left[\frac{d_2 - d_1}{2 * C} \right]$$

$$\theta_d = \pi - 2 \sin^{-1} \left[\frac{50.53 - 16.33}{2 * 58.44} \right]$$

$$\theta_d = 146.83^\circ = 2.56 \text{ rad}$$

Velocidades angulares, torques y fuerza tangencial en las catarinas -

Velocidad angular de la catarina conducida:

$$\omega_2 = \frac{\pi * n_2}{30}$$

$$\frac{\pi * 35.36 \text{ rad}}{30} = 3.703 \text{ s}$$

- Velocidad angular de la catarina motriz:

$$\omega_1 = \frac{\pi * n_1}{30}$$

$$\omega_1 = \frac{\pi * 109}{30} = 11.41 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

- Torque en la catarina conducida:

$$T_2 = \frac{P}{\omega_2}$$

$$T_2 = \frac{165.78 \text{ KW}}{3.703} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_2 = 44.77 \text{ KN. m}$$

- Torque en la catarina motriz:

$$T_1 = \frac{P}{\omega_1}$$

$$T_1 = \frac{165.78 \text{ KW}}{11.41} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_1 = 14.79 \text{ KN.m}$$

- Fuerza tangencial ejercida por la cadena:

El diámetro de paso del piñón, es 16.33 pulg (0.4148 m)

$$T^1 = F_t * \frac{d_1}{2}$$

$$14.79 \text{ KN.m} = F_t * \frac{0.4148 \text{ m}}{2}$$

$$F_t = 71.31 \text{ KN}$$

Comentario: la fuerza tangencial es la misma ejercida tanto para el lado de la catarina motriz que la conducida.

3.7.8. Diseño del eje de transmisión de potencia del molino de bolas, rodapiamientos, soldadura

En la figura 3.11, se muestran la descomposición de la fuerza tangencial de la cadena, en el X y Y

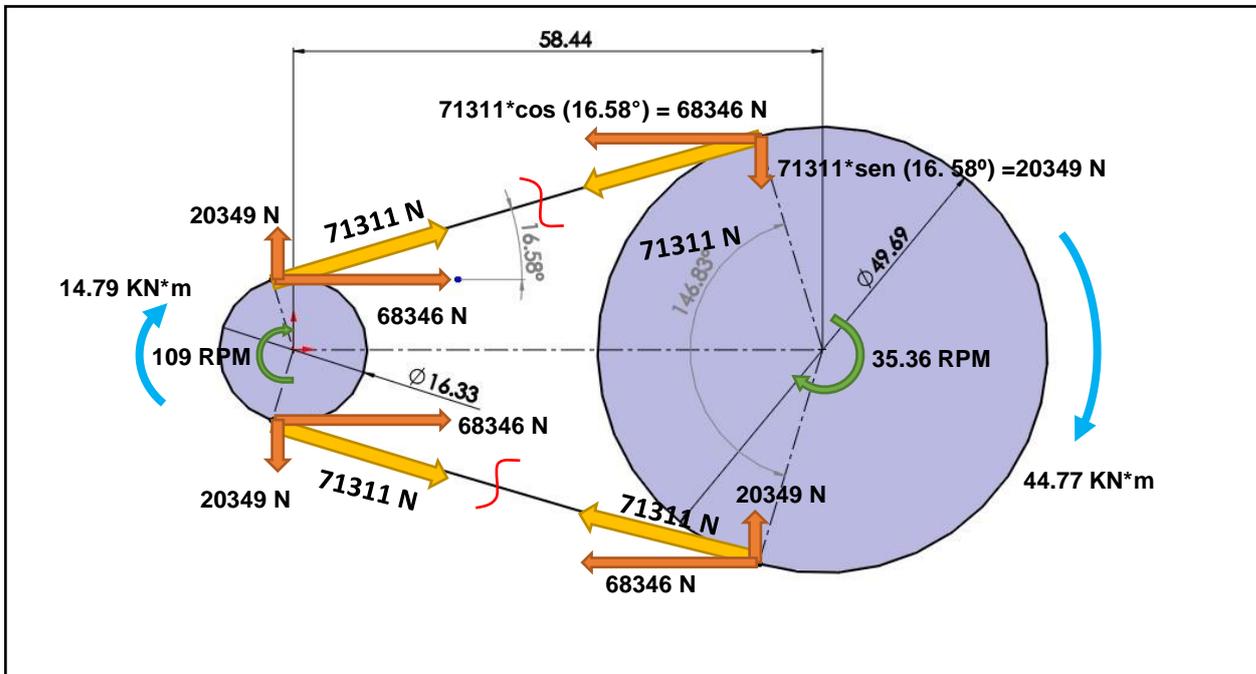


Figura 3.11, Descomposición de las tensiones de la cadena. Y en la figura 3.12, se muestra el DCL (Diagrama de cuerpo libre) del eje del molino de bolas.

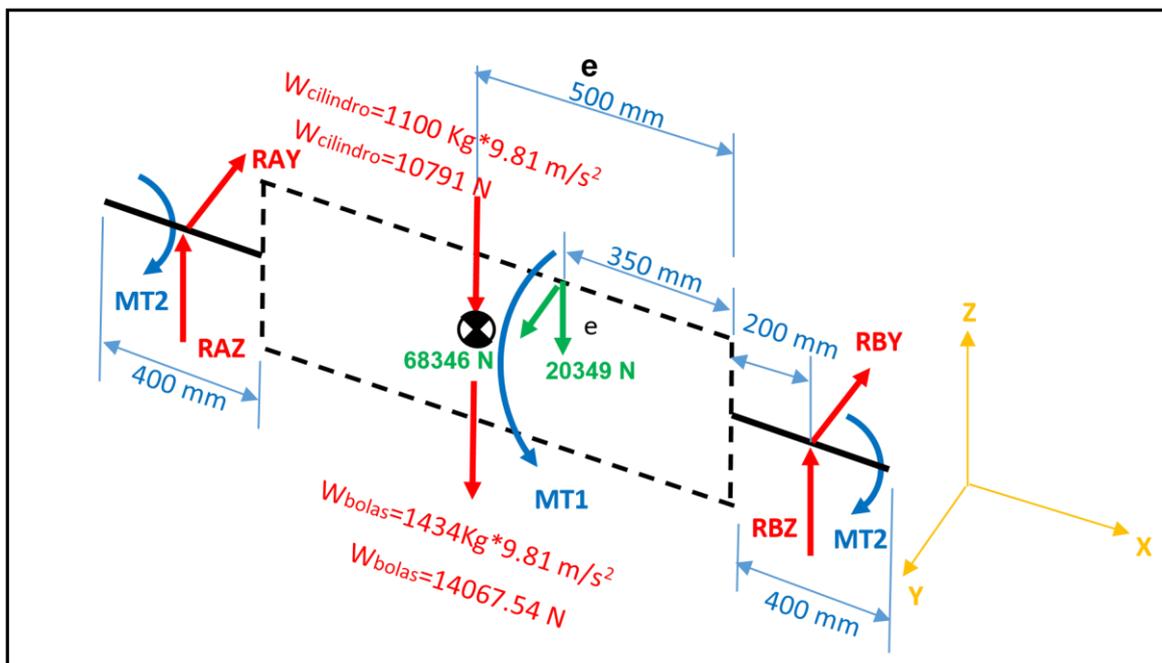


Figura 3.12, DCL del molino de bolas

Determinación de las reacciones en los apoyos o rodapiamientos:

$$\sum(M_A)_y = 0$$

$$-14067.54 * 0.7 - 10791 * 0.7 - 20349 * 0.85 + R_{BZ} * 1.4 = 0$$

$$R_{BZ} = 24784.02 \text{ N}$$

0

$$-68346 * 0.85 + R_{BY} * 1.4 = 0$$

$$R_{BY} = 41495.79 \text{ N}$$

$$\sum(M_A)_x = 0$$

$$MT_1 - MT_2 - MT_2 = 0$$

$$MT_1 = 2 * MT_2$$

$$MT_1$$

$$MT_2 = \frac{\quad}{2}$$

$$44.77 \text{ KN.m}$$

$$MT_2 = \frac{44.77 \text{ KN.m}}{2} = 22385 \text{ N.m}$$

$$\sum(F)_z = 0$$

$$R_{AZ} - 10791 - 14067.54 + R_{BZ} - 20349 = 0$$

$$R_{AZ} - 10791 - 14067.54 + 24784.02 - 20349 = 0$$

$$R_{AZ} = 20423.52 \text{ N}$$

0

$$68346 - R_{BY} - R_{AY} = 0$$

$$68346 - 41495.79 - R_{AY} = 0$$

$$R_{AY} = 26850.21 \text{ N}$$

Diagramas de carga del eje transmitido

Diagrama de Fuerza cortante $V_y - X$

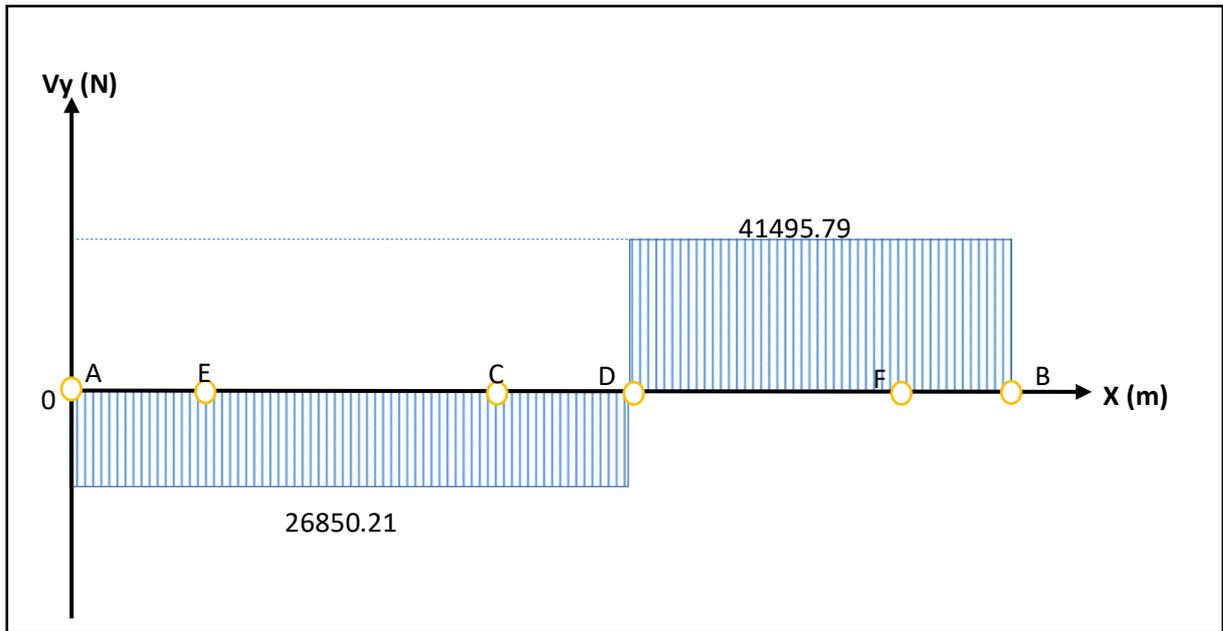


Figura 3.13, Diagrama de Fuerza cortante $V_y - X$.

Diagrama de Fuerza cortante $V_z - X$

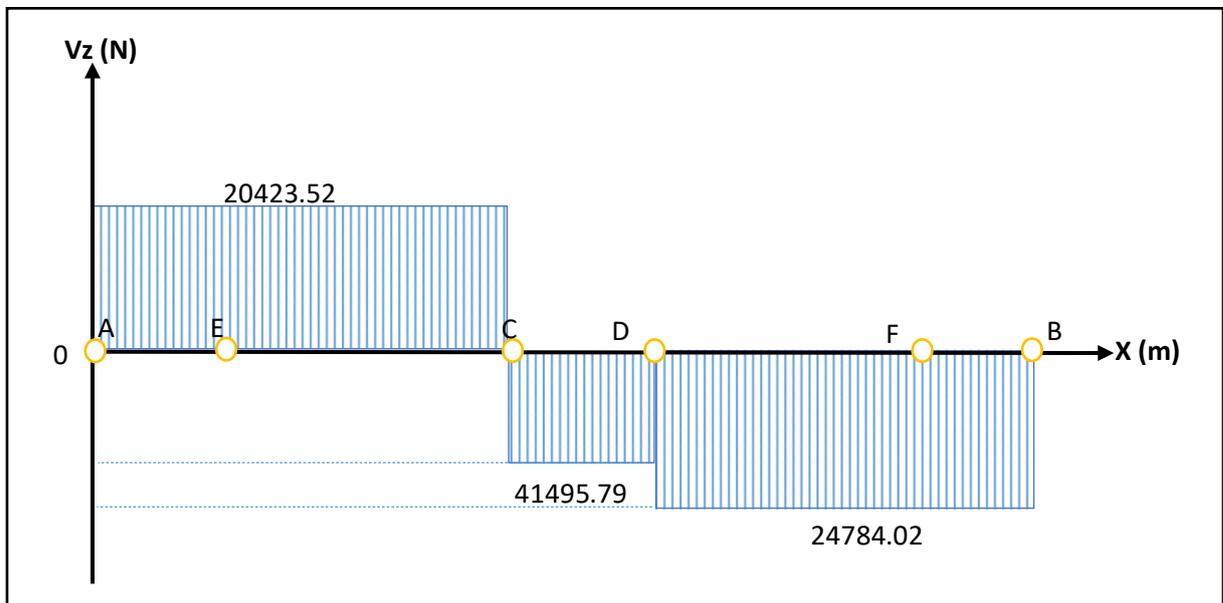


Figura 3.14, Diagrama de Fuerza cortante $V_z - X$

Diagrama de Momento flexionante $M_z - x$

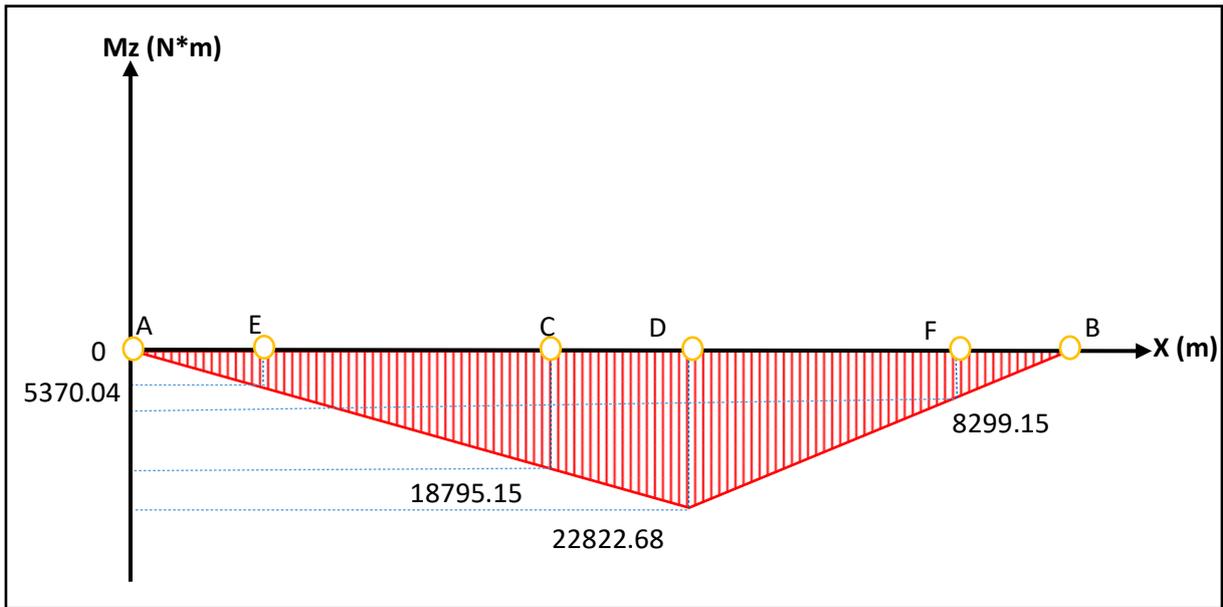


Figura 3.15, Diagrama de Momento flexionante $M_z - x$

Diagrama de Momento flexionante $M_y - x$

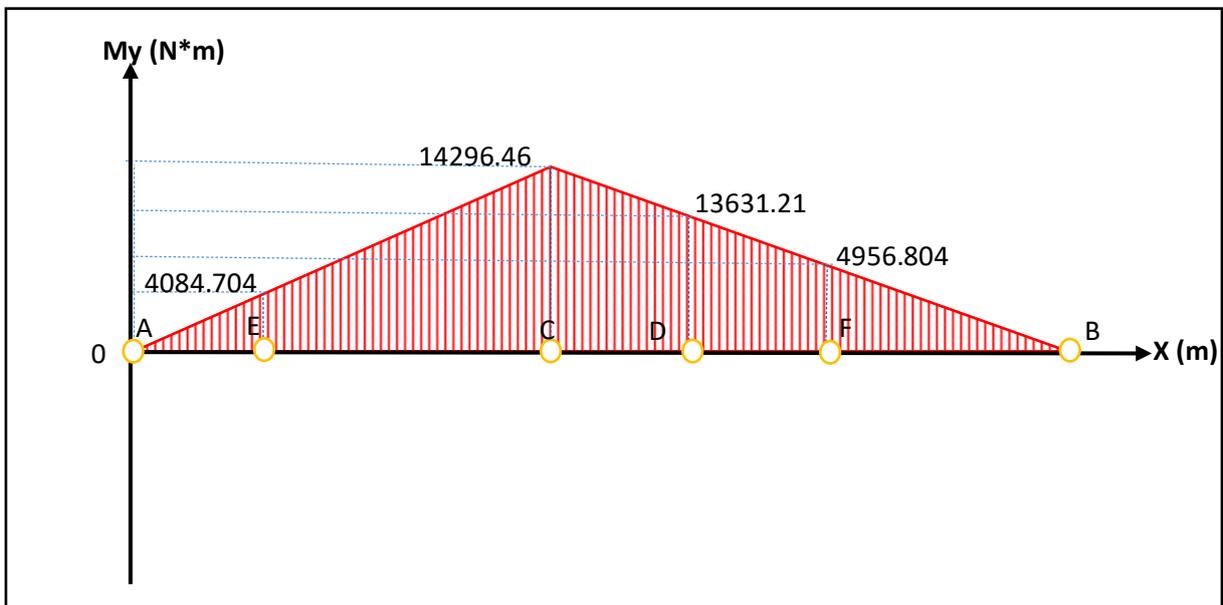


Figura 3.16, Diagrama de Momento flexionante $M_y - x$

Diagrama de Momento resultante $M_R - X$

Para determinar el momento resultante, en cada sección, utilizaremos la siguiente, formulación

$$M_R = \sqrt{M_{y2} + M_{z2}}$$

Para la sección A:

$$M_R = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para la sección E:

$$M_R = \sqrt{4084.704^2 + 5370.04^2} = 6747.01 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para la sección C:

$$M_R = \sqrt{14296.46^2 + 18795.15^2} = 23614.54 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para la sección D:

$$M_R = \sqrt{13631.21^2 + 22822.68^2} = 26583.54 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para la sección F:

$$M_R = \sqrt{4956.80^2 + 8299.15^2} = 9666.73 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para la sección B:

$$M_R = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$$

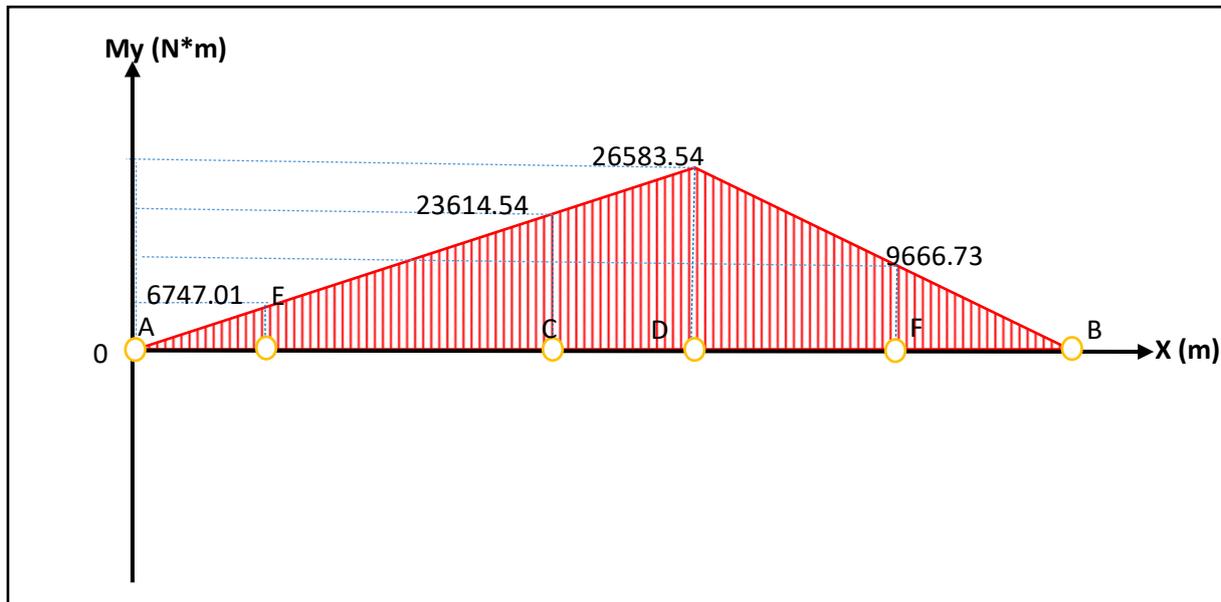


Figura 3.17, Diagrama de Momento resultante MR – X

Diagrama de Momento torsor T – X

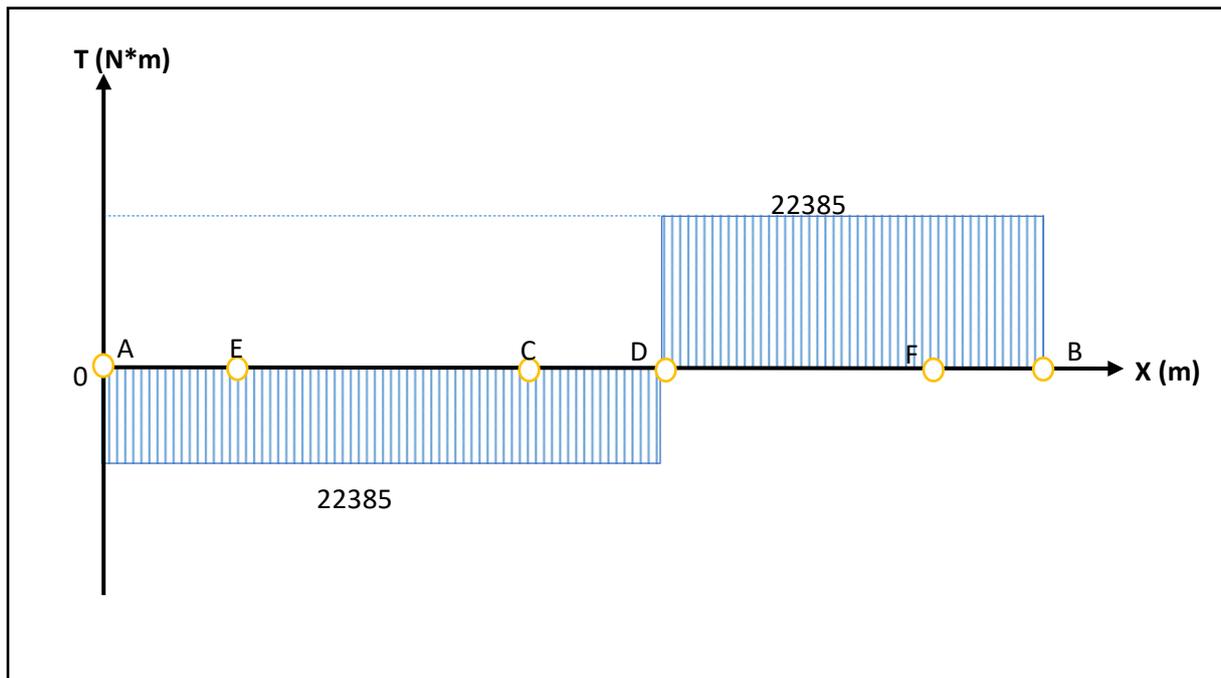


Figura 3.18, Diagrama de Momento torsor T – X

Se concluye, que el punto crítico, está localizado en la sección “D”

3.7.9. Cálculo de esfuerzos (Shigley, 2008).

Para determinar, el diámetro requerido de los ejes, se evalúa bajo las máximas cargas encontradas, solo en los puntos de los ejes “E” y “F” donde la mayor carga se encuentra en el punto “F”, es decir:

- Momento Flexionante: 9666.73 N.m
- Momento Torsor: 22385 N.m

Se debe, detallar que el eje de transmitido, es un eje hueco, ya que es necesario para la evacuación del carbón pulverizado, es decir:

$$d_{ext} = d_{int} + 2 * t$$

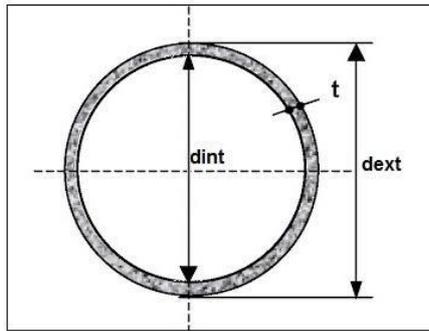


Figura 3.19, Área del eje transmitido del molino de bolas

Esfuerzo flexionante:

$$\sigma_f = \frac{M_R * C}{4 I} \quad C = \frac{d_{ext}}{2}$$

$$I = \frac{\pi * (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64}$$

Simplificamos la ecuación del esfuerzo flexionante

$$\sigma_f = \frac{M * R}{\frac{\pi * (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64}}$$

Obtenemos:

$$\sigma_f = 10.186 * \frac{M * R_{d_{ext}}}{d_{ext}^4 - d_{int}^4}$$

Reemplazando, el momento resultante y diámetro exterior:

$$\sigma_f = 10.186 * \frac{9666.73 * (d_{int} + 2 * t)}{(d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4}$$

$$\sigma_f = \frac{98465.31 * (d_{int} + 2 * t)}{(d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4}$$

Esfuerzo torsor:

$$\tau = \frac{T * C}{J} \quad C = \frac{d_{ext}}{2}$$

$$\tau_T = \frac{2}{44} J \left\{ \frac{\pi * (d_{ext} - d_{int})}{32} \right\}$$

Simplificamos la ecuación del esfuerzo torsionante:

$$\tau = T * \frac{r}{J} = \frac{T * \frac{d_{ext}}{2}}{\frac{\pi * (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{32}}$$

Obtenemos:

$$\tau_T = 5.093 * \frac{T d_{ext}}{d_{ext}^4 - d_{int}^4}$$

Reemplazando, el momento torsor y diámetro exterior:

$$\tau_T = 5.093 * \frac{22385 * (d_{int} + 2 * t)^4}{(d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4}$$

$$\tau_T = \frac{114006.805 * (d_{int} + 2 * t)^4}{(d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4}$$

Límite de resistencia de la fatiga:

$$S_e^* = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{Kpsi} (1400 \text{MPa}) \\ 100 \text{Kpsi} S_{ut} & > 200 \text{Kpsi} (1400 \text{MPa}) \\ 700 \text{MPa} & S_{ut} > 1400 \text{MPa} \end{cases}$$

Los materiales, para el diseño de ejes, siempre tienen valores por debajo de 1400MPa

$$S_e^* = 0.5 * S_{ut}$$

Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga: (Shigley, 2008)

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * S_e^*$$

- Factor de superficie: "K_a"

Los ejes para transmisión son maquinados o laminados en frío, por lo tanto:

$$K_a = a * S_{ut}^b$$

Ver Anexo A.14; $a = 4.51 \text{MPa}$ y $b = -0.265$

Reemplazando:

$$K_a = 4.51 * (S_{ut})^{-0.265}$$

Considerando, que, en la formulación del factor de superficie, el esfuerzo último debe reemplazarse en MPa

- Factor de Tamaño: " K_b "

Para ejes de diámetros exteriores en el rango de 51mm a 254mm, el factor de tamaño, sería: Anexo A.15

$$K_b = 1.51 * d^{-0.157}$$

Considerando en dicha formulación que "d", debe ingresar en mm Reemplazando, el diámetro exterior, tenemos:

$$K_b = 1.51 * (d_{int} + 2 * t)^{-0.157}$$

- Factor de carga: " K_c "

$$K_c = \begin{cases} 1 & \text{flexion} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsion} \end{cases}$$

El eje transmitido, del molino de bolas, soporta cargas por flexión y torsión, es decir como valor crítico, el valor de carga, sería:

$$K_c = 0.59$$

- Factor de temperatura: " K_d "

El eje transmitido del molino de bolas, se expone a temperatura ambiental, 20°C, es decir: (Ver Anexo A.16)

$$K_d = 1$$

- Factor de confiabilidad: "K_e"

El diseño, expuesto se requiere con una probabilidad de falla de 0.1%, es decir con una probabilidad del 99.9%, donde el factor de confiabilidad, sería: (Ver Anexo A.17)

$$K_e = 0.753$$

Límite de resistencia a la fatiga real:

$$S_e = 4.51 * (S_{ut})^{-0.265} * 1.51 * (d_{int} + 2 * t)^{-0.157} * 0.59 * 1 * 0.753 * 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = 1.513 * (S_{ut})^{0.735} * (d_{int} + 2 * t)^{-0.157}$$

El esfuerzo por la teoría de la máxima energía de distorsión:

$$\sigma_m^2 = (\sigma_{xm})^2 + (\sigma_{ym})^2 - (\sigma_{xm})(\sigma_{ym}) + 3(\tau_{xym})^2$$

Simplificando, para esfuerzos en el plano:

$$\sigma_m = \sqrt{3} * \tau_{xym}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3} * \frac{114006.805 * (d_{int} + 2 * t)}{d_{int}^4} \quad (d_{int} + 2 * t)^4 -$$

$$\sigma_m = \frac{197465.6 * (d_{int} + 2 * t)}{(d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4}$$

El esfuerzo alterno por la teoría de la máxima energía de distorsión:

$$\sigma_a^2 = (\sigma_{xa})^2 + (\sigma_{ya})^2 - (\sigma_{xa})(\sigma_{ya}) + 3(\tau_{xym})^2$$

Para esfuerzos en el plano:

$$\sigma_a = \sigma_{xa}$$

$$\sigma_a = \frac{98465.31 * (d_{int} + 2 * t)}{(d + 2 * t)^4 - d_{int}^4}$$

Factor de seguridad según la teoría de Goodman:

$$\frac{1}{N} = \frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e}$$

Reemplazando todos los valores encontrados, tenemos:

$$\frac{1}{N} = \frac{\frac{197465.6 * (d_{int} + 2 * t)}{((d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4) * 10^6}}{S_{ut}} + \frac{\frac{98465.31 * (d_{int} + 2 * t)}{((d_{int} + 2 * t)^4 - d_{int}^4) * 10^6}}{1.513 * (S_{ut})^{0.735} * (d_{int} + 2 * t)^{-0.157}}$$

Cabe resaltar, que se multiplico al denominador del esfuerzo medio y alterno por 10⁶, con la finalidad de poder reemplazar el “Sut” en MPa. También, se debe precisar que en la ecuación del “Se”, el diámetro interior y el espesor se deben reemplazar en mm, mientras que en las formulaciones del esfuerzo medio y alterno se reemplazan en metros.

Para el diseño, del eje, se consideran los siguientes datos:

- El procedimiento, se basa en la iteración de asumir materiales, valores de diámetro y espesor comerciales, hasta obtener un factor de seguridad superior a la unidad aproximado a 2. A continuación, se presentan los valores de diámetro, espesor y material adecuados que quedaron como resultados, luego del procedimiento de la iteración:
- Material: ASTM A-53 Grado B, es un producto muy útil debido a sus características típicas de buena resistencia mecánica y buena ductilidad. En términos generales excelente soldabilidad y mejor maquinabilidad que la mayoría de los aceros al carbón)

Esfuerzo a la fluencia: Sy = 250 MPa (Anexo A.18)

Esfuerzo ultimo: Sut = 420 MPa (Anexo A.18)

Espesor: t=0.718 in =18.24 mm (SCH 120)

Diámetro Exterior: 219 mm

Es necesario mencionar que se considera este tubo sin costura de tal cédula para realizar el maquinado y generar el resalte para acoger el rodamiento. De este modo, se considera el diámetro exterior del eje igual a 200.

Entonces el factor de seguridad, resultó:

$$\frac{1}{N} = \frac{\frac{197465.6 * 0.200}{((0.200)^4 - (0.183)^4) * 10^6}}{420} + \frac{\frac{98465.31 * 0.200}{((0.200)^4 - (0.183)^4) * 10^6}}{1.513 * (420)^{0.735 * (0.200)^{-0.157}}}$$

$$N = 2.24$$

3.7.10. Dimensionamiento y selección de rodamientos

Se dimensionarán los rodamientos para los puntos de apoyo, localizados en A y B, debido a que los rodamientos solo se expondrán a fuerzas cortantes o radiales, se seleccionarán rodamientos rígidos de bolas. Se considera despreciable el valor de la fuerza axial sobre el rodamiento. (<http://www.skf.com/>):

Rodamiento en el Punto “A” Datos:

- Componente radial en el eje “z”: $R_{Az} = 20423.52\text{N}$

- Componente radial en el eje “y”: $R_{Ay} = 26850.21\text{ N}$

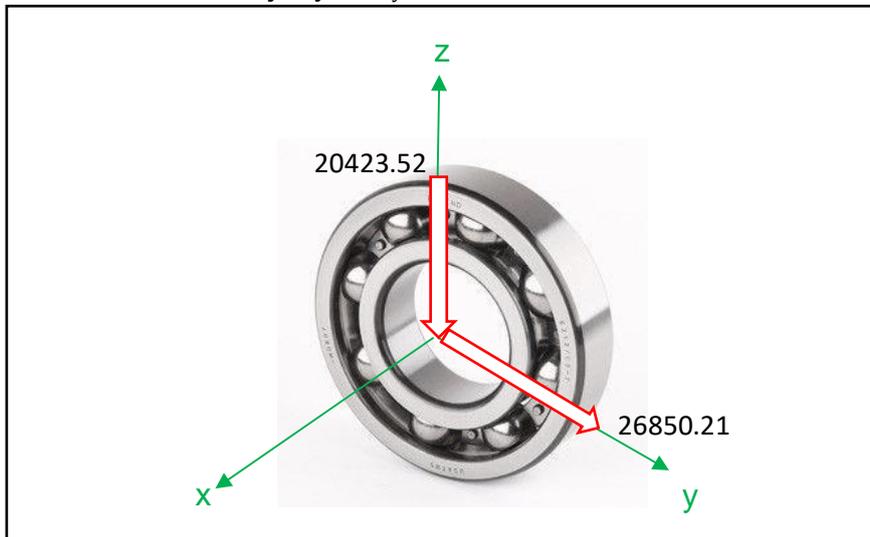


Figura 3.20, Fuerzas aplicadas al rodamiento localizado en el punto de apoyo “A”
Fuerza Radial:

$$F_R = \sqrt{R_{Az}^2 + R_{Ay}^2}$$

$$F_R = \sqrt{(20423.52)^2 + (26850.21)^2}$$

$$F_R = 33735.06 \text{ N}$$

Fuerza Axial:

$$F_a = 0$$

- Carga equivalente: Debido a que no existe fuerza Axial, la carga equivalente es igual a la fuerza radial.

$$P = F_R = 33735.06 \text{ N}$$

- La vida estimada para un Rodamiento SKF, para molinos la vida estimada máxima, es: (Anexo A.19)

$$L_{10h} = 25000 \text{ horas}$$

- El rodamiento, estará expuesto a la velocidad adecuada del molino de bolas

$$n = N_0 = 35.36 \text{ RPM}$$

- Carga dinámica: Para un rodamiento SKF, el cálculo de la duración de vida se determina, según la ecuación:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 * n} * \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Despejando la carga dinámica, tenemos:

$$C = P * \sqrt[p]{\frac{60 * L_{10h} * n}{10^6}}$$

Reemplazando los valores encontrados:

$p = 3$ (Exponente de duración de vida para rodamientos de bolas)

$$C = 33735.06 * \sqrt[3]{\frac{60 * 25000 * 35.36}{10^6}}$$

$$C = 126750.38 \text{ N} = 126.75 \text{ KN}$$

De tablas de Rodamientos SKF, seleccionamos un rodamiento rígido de bolas, para un diámetro de eje de 200 mm de designación 61940 MA con una capacidad de carga dinámica de 148 KN. (Ver Anexo A.20)

Rodamiento en el Punto "B"

Datos:

- Componente radial en el eje "z": $R_{Bz} = 24784.02 \text{ N}$

- Componente radial en el eje "y": $R_{By} = 41495.79 \text{ N}$

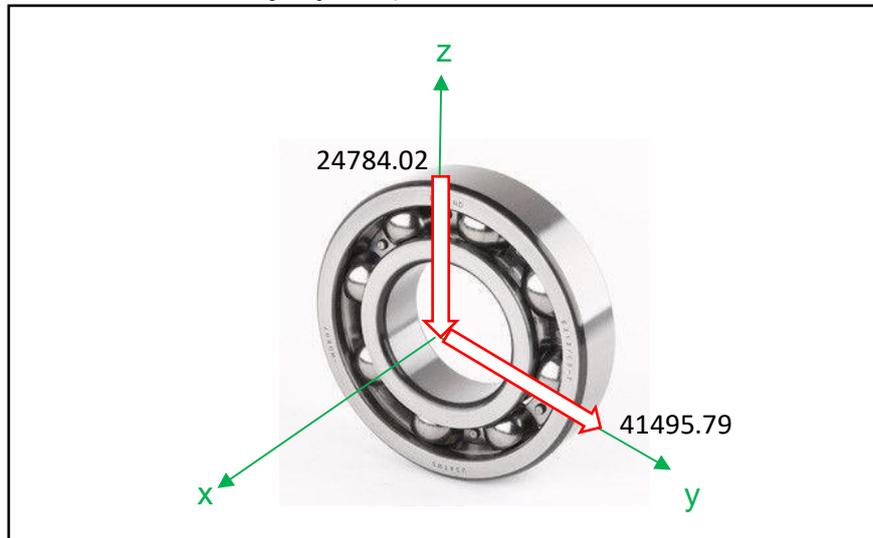


Figura 3.21, Fuerzas aplicadas al rodamiento localizado en el punto de apoyo "B"

Fuerza Radial:

$$F_R = \sqrt{R_{Bz}^2 + R_{By}^2}$$

$$F_R = \sqrt{(24784.02)^2 + (41495.79)^2}$$

$$F_R = 48333.72 \text{ N}$$

Fuerza Axial:

$$F_a = 0$$

- Carga equivalente: Debido a que no existe fuerza Axial, la carga equivalente es igual a la fuerza radial.

$$P = F_R = 48333.72 \text{ N}$$

- La vida estimada para un Rodamiento SKF, para molinos la vida estimada máxima, es: (Anexo A.19)

$$L_{10h} = 25000 \text{ horas}$$

- El rodamiento, estará expuesto a la velocidad adecuada del molino de bolas

$$n = N_0 = 35.36 \text{ RPM}$$

- Carga dinámica: Para un rodamiento SKF, el cálculo de la duración de vida se determina, según la ecuación:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 * n} * \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Despejando la carga dinámica, tenemos:

$$C = P * \sqrt[p]{60 * 10^6 * L_{10h} * n}$$

Reemplazando los valores encontrados:

$p = 3$ (Exponente de duración de vida para rodamientos de bolas)

$$C = 48333.72 * \sqrt[3]{\frac{60 * 25000 * 35.36}{10^6}}$$

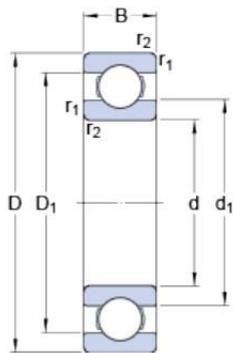
$$C = 181600.92 \text{ N} = 181.60 \text{ KN}$$

De tablas de Rodamientos SKF, seleccionamos un rodamiento rígido de bolas, para un diámetro de eje de 200 mm de designación 6040 con una capacidad de carga dinámica de 216 KN. (Ver Anexo A.20)

En la figura 3.22, se muestra las dimensiones principales del rodamiento de bolas, de los apoyos en A y B

61940 MA

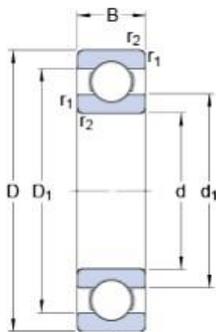
Dimensiones



d	200	mm
D	280	mm
B	38	mm
d_1	\approx 225.7	mm
D_1	\approx 255.2	mm
$r_{1,2}$	min. 2.1	mm

6040

Dimensiones



d	200	mm
D	310	mm
B	51	mm
d_1	\approx 235.1	mm
D_1	\approx 274.95	mm
$r_{1,2}$	min. 2.1	mm

Figura 3.22, Dimensiones del rodamiento SKF 61940 MA y 6040.

Según SKF el resalte para ambos rodamientos será el mismo, igual a 2 mm.

3.7.11. Dimensionamiento y selección de rodamientos del eje motriz

Se dimensionarán los rodamientos para el punto B del eje motriz, debido a que los rodamientos solo se expondrán a fuerzas cortantes o radiales, se seleccionarán rodamientos rígidos de bolas. Se considera despreciable el valor de la fuerza axial sobre el rodamiento. (<http://www.skf.com/>):

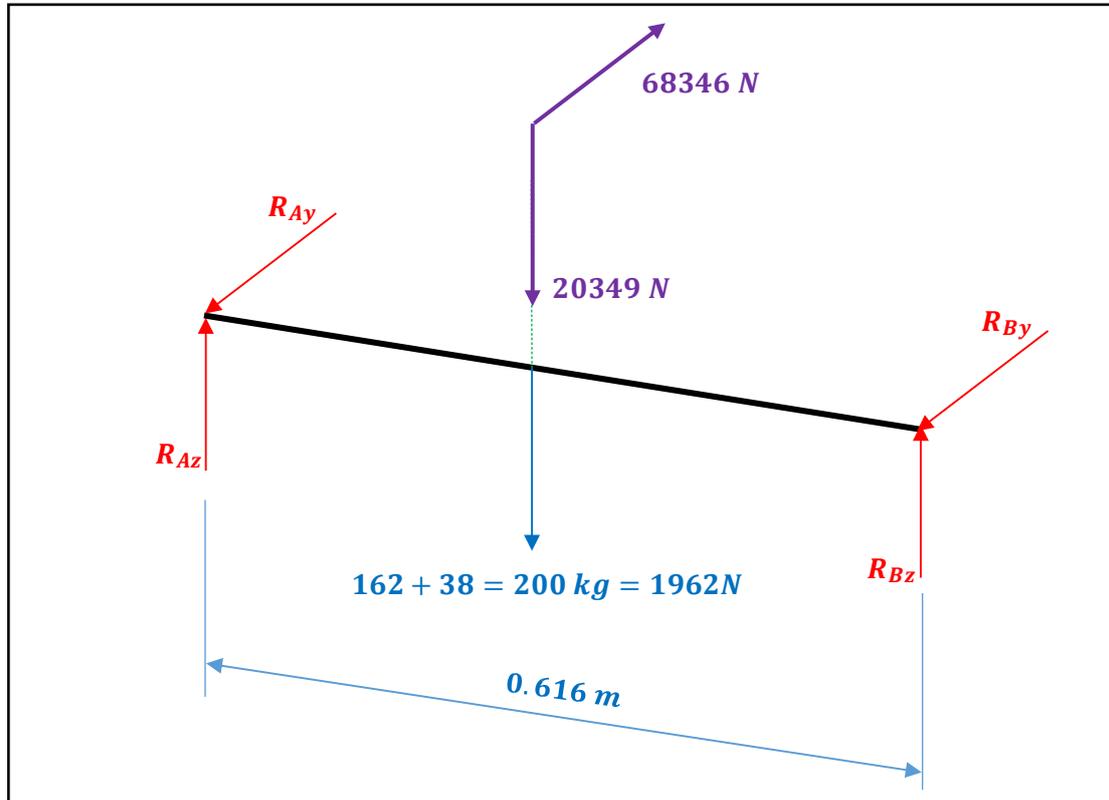


Figura N°3.23, D.C.L de eje motriz.

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{Az} = R_{Bz} = 11155.5 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} = R_{By} = 34173 \text{ N}$$

El rodamiento en el punto A es dimensionado por el proveedor del reductor de velocidad.

- Componente radial en el eje "z": $R_{Bz} = 11155.5 \text{ N}$

- Componente radial en el eje "y": $R_{By} = 34173 \text{ N}$

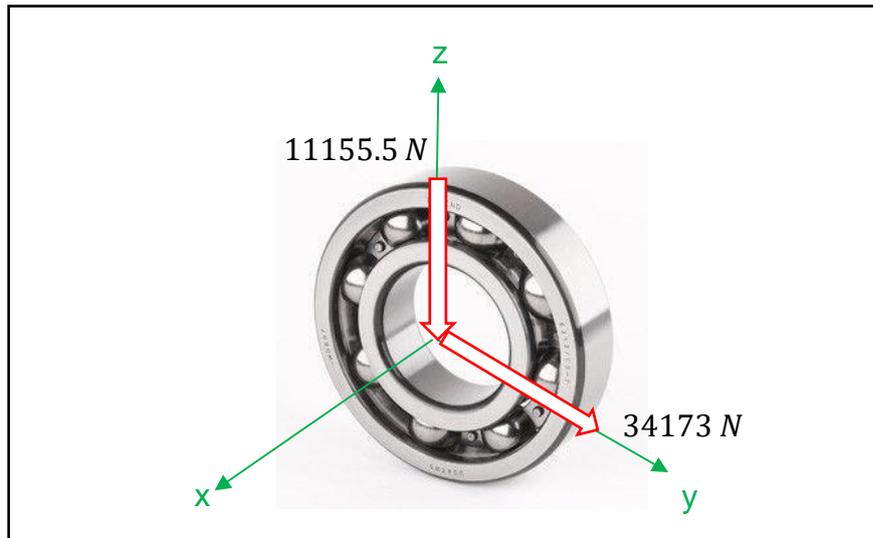


Figura 3.24, Fuerzas aplicadas al rodamiento localizado en el punto de apoyo “B”

Fuerza Radial:

$$F_R = \sqrt{R_{Az}^2 + R_{Ay}^2}$$

$$F_R = \sqrt{(11155.5)^2 + (34173)^2}$$

$$F_R = 35947.73 \text{ N}$$

Fuerza Axial:

$$F_a = 0$$

- Carga equivalente: Debido a que no existe fuerza Axial, la carga equivalente es igual a la fuerza radial.

$$P = F_R = 35947.73 \text{ N}$$

- La vida estimada para un Rodamiento SKF, para molinos la vida estimada máxima, es: (Anexo A.19)

$$L_{10h} = 17300 \text{ horas}$$

- El rodamiento, estará expuesto a la velocidad del reductor.

$$n = N_0 = 109 \text{ RPM}$$

- Carga dinámica: Para un rodamiento SKF, el cálculo de la duración de vida se determina, según la ecuación:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 * n} * \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Despejando la carga dinámica, tenemos:

$$C = P * \sqrt[p]{\frac{60 * 10^6 * L_{10h} * n}{10^6}}$$

Reemplazando los valores encontrados:

$p = 3$ (Exponente de duración de vida para rodamientos de bolas)

$$C = 35947.73 * \sqrt[3]{\frac{60 * 21000 * 109}{10^6}}$$

$$C = 174053 \text{ N} = 174.10 \text{ KN}$$

De tablas de Rodamientos SKF, seleccionamos un rodamiento rígido de bolas, para un diámetro de eje de 100 mm de designación 6320 M con una capacidad de carga dinámica de 174 KN. (Ver Anexo A.20)

3.7.12. Diseño del cilindro del molino de bolas

Planteamiento del diámetro exterior y espesor del molino de bolas:

Determinaremos el diámetro exterior, para luego determinar el espesor del cilindro de molino de bolas, según las formulaciones de Bond (**Thomas & Filippov, 1999**).

$$\left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{\pi * S_y}\right)^2 = \left(\frac{330 * n}{\pi * S_y}\right)^2 * (4M^2 + T^2)$$

Donde:

- D_i : Diámetro interior del cilindro, $D_i = 1 \text{ m}$ (39.37in)
- M : Momento máximo: 26583.54 N.m
- T : Momento torsor: 22385 N.m
- S_y : Esfuerzo de fluencia, material ASTM A-36, $S_y = 36 \text{ KPsi}$ (250MPa)
- n : Factor de seguridad, $n = 5$.

Reemplazando, tenemos:

$$\left(\frac{D_o}{D_i}\right) = \left(330 * 5\right)^2 * (4(26583.54)^2 + (22385)^2) \frac{4 - 14^2}{\pi * 250 * 10^6}$$

$$D_o$$

$$D_o = 1.029839 \text{ m}$$

El espesor del cilindro del molino de bolas, sería:

$$= \frac{D_o - D_i}{2}$$

$$t = \frac{1.029839 \text{ m} - 1 \text{ m}}{2}$$

$$t = 0.0149 \text{ m} = 0.587 \text{ in}$$

A valores comerciales el espesor del cilindro de molino de bolas, sería:

$$t = \frac{5}{8} \text{ in}$$

Por lo tanto, el diámetro exterior sería:

$$D_o = D_i + 2 * t$$

$$D_o = 39.37 \text{ in} + 2 * 0.625 \text{ in}$$

$$D_o = 40.62 \text{ in} = 1.032 \text{ m}$$

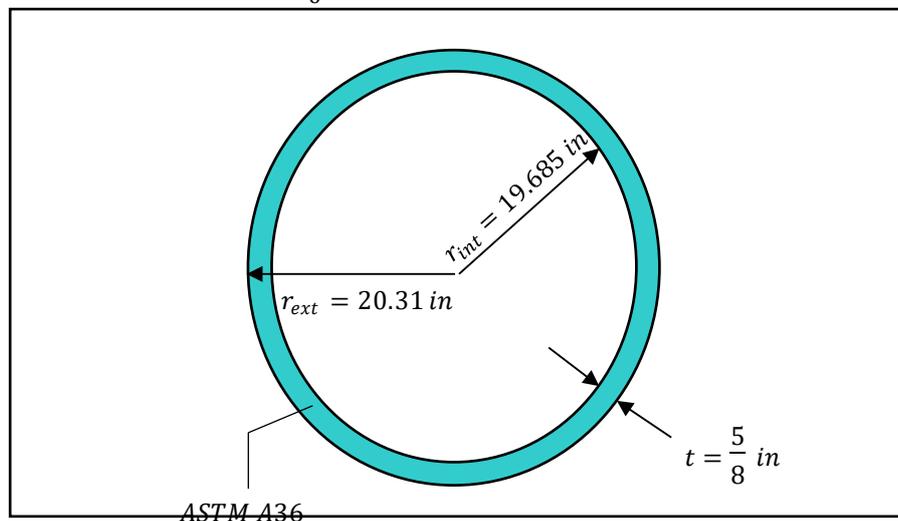


Figura 3.25, Dimensiones del molino de bolas

3.7.13. Peso que soportará la estructura del cilindro del molino de bolas

$$P_{total} = P_{cilindro} + P_{bolas} + P_{carbón}$$

acero Donde:

- La masa del cilindro, las bridas y los tubos de ingreso y descarga: 731.34 Kg (7174.45 N)

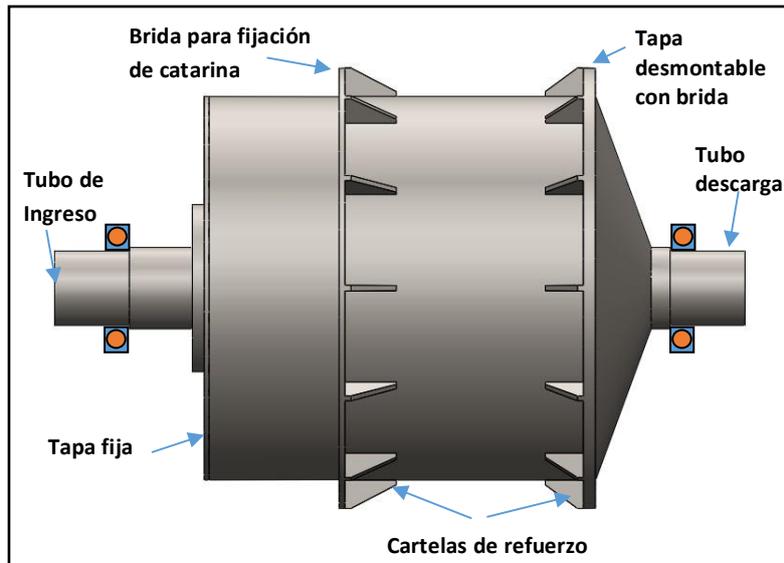


Figura 3.26, Dimensiones del molino de bolas

- La masa de bolas: 1434 Kg (14067.54 N)
- Para determinar la masa de carbón, se procede a multiplicar el flujo másico de carbón de 12000 Kg/h, por el tiempo de molienda 0.25 horas, tendríamos 3000Kg (29430 N)

Reemplazando:

$$P_{total} = 7174.45 \text{ N} + 14067.54 \text{ N} + 29430$$

$$P_{total} = 50\ 671.99 \text{ N}$$

3.7.14. Cálculo del revestimiento interno del molino de bolas:

El cilindro del molino contará con un revestimiento interior del tubo principal, el mismo será construido con 6 planchas de lámina de acero, con un ángulo de sector circular igual a 60° y separados por 20mm, de las cuales serán empernadas a este, con el fin de proteger del desgaste al mismo, el cual estará colocado de acuerdo a la siguiente disposición: **(Shigley, 2008)**.

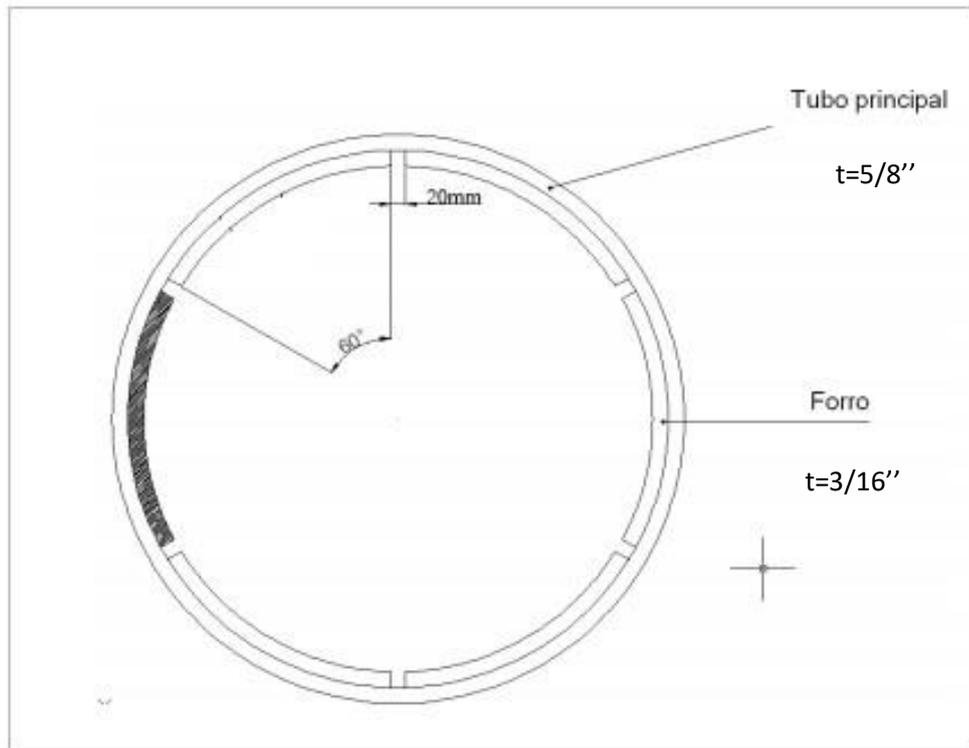


Figura 3.27, Revestimiento del molino de bolas

- Número de planchas en el perímetro interior: 6
- Número de planchas a lo largo de la longitud: 3
- Número de planchas totales: 18

Mediante la teoría de falla, por el esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{P_{total}}{A}$$

Las dimensiones de las placas son: 0.5036m x 0.333m

El área de la placa sometida al mayor esfuerzo cortante es: $A = 0.333 * t$, por lo tanto el esfuerzo cortante de trabajo sería:

$$= \frac{50\,671.99 \text{ N}}{97} = \frac{152\,168.14 \tau}{97}$$

$$0.333 * t \quad t$$

Esfuerzo cortante máximo de la placa por diseño: las placas bases serán de material ASTM A-36, por lo tanto, el esfuerzo de fluencia es 250 MPa.

$$= \frac{S_y \tau_{\max}}{2}$$

$$\tau_{\max} = 250 \frac{\quad}{2} * 10^6 \text{Pa} = 125 * 10^6 \text{Pa}$$

Factor de seguridad: considerando un factor de seguridad de 3

$$n = \frac{\tau_{\max}}{\tau}$$

$$3 = \frac{125 * 10^6 \text{Pa}}{\frac{152\,168.14}{t}}$$

El espesor de la placa, sería:

$$t = 3.7 \text{ mm}$$

pero considerando un espesor comercial:

$$t = \frac{3''}{16} = 4.76 \text{ mm}$$

3.7.15. Dimensionamiento de pernos para las placas del revestimiento

El número de pernos que contará por cada placa será 8 pernos, pero se cuenta con 18 placas, lo que hace un total de 144 pernos. (Shigley, 2008).

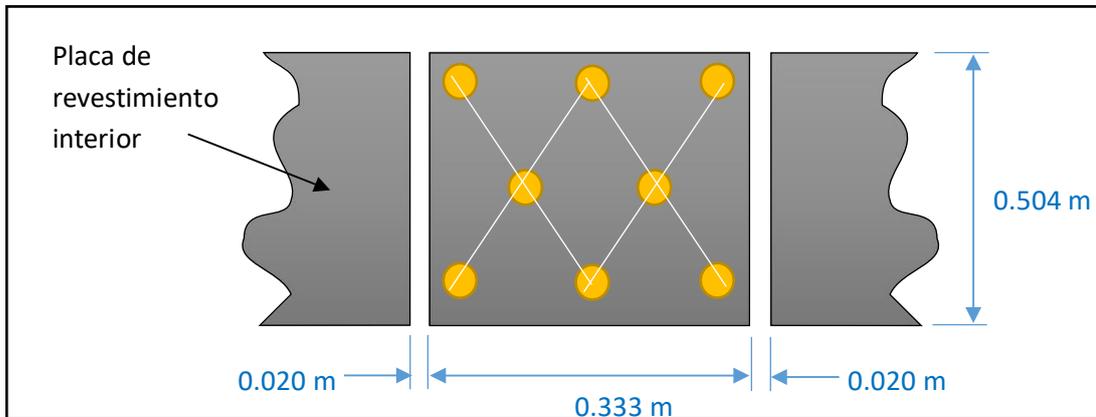


Fig. 3.28, Disposición de pernos en placas de revestimiento interno del molino de bolas.

- Fuerza cortante por cada perno:

$$V_{\text{Perno}} = \frac{P_{\text{total}}}{N^{\circ} \text{ pernos}} = \frac{50\,671.99 \text{ N}}{144} = 351.89 \text{ N}$$

- Esfuerzo cortante máximo por diseño del perno:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{S_y}{2}$$

Seleccionamos pernos con clase de resistencia 5.8 con esfuerzo de fluencia de 38 Kg/mm²(373MPa). Anexo A.25, se muestran las dimensiones y características

$$\tau_{\text{max}} = \frac{373 \text{ MPa}}{2}$$

$$\tau_{\text{max}} = 186.5 \text{ MPa}$$

- Factor de seguridad: para un factor de seguridad de 5, al igual que para el cilindro.

$$n = \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau} = 5$$

Despejando el esfuerzo cortante de trabajo.

$$\tau = \frac{\tau_{\max}}{n}$$

Dónde:

$$\frac{V_{\text{Perno}}}{A} = \frac{\tau_{\max}}{n}$$

El área transversal de cada perno sería:

$$A = \frac{n * V_{\text{Perno}}}{\tau_{\max}}$$

Sustituyendo el área en función del diámetro del perno, tenemos:

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{n * V_{\text{Perno}}}{\tau_{\max} * \pi}$$

Despejando el diámetro del perno:

$$d = \sqrt{\frac{4 * n * V_{\text{Perno}}}{\tau_{\max} * \pi}}$$

El diámetro de los pernos normalizado sería:

$$d = \sqrt{\frac{4 * 5 * 351.89 \text{ N}}{186.5 * 10^6 * \pi}}$$

$$d = 3.5 \text{ mm} = 0.138''$$

Diámetro comercial:

$$d_{\text{perno revestimiento}} = \frac{3}{16} \text{ in}$$

3.7.16. Dimensionamiento y selección de pernos para catarina

En la figura 3.29, se muestra la disposición de los pernos que se utilizarán para acoplar la catarina al cuerpo cilíndrico del molino de bolas. En total se consideran 12 agujeros para perno M14. Se sabe que el agujero debe tener una mínima holgura para que el perno pueda ingresar con facilidad. (Shigley, 2008).

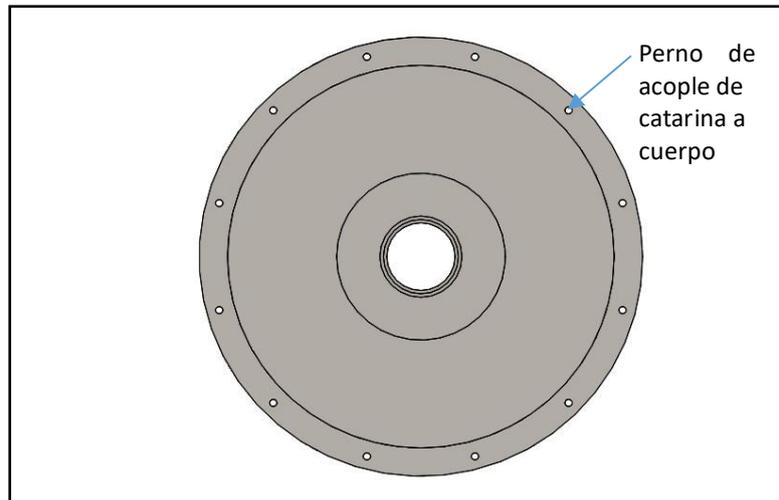


Figura 3.29, Agujeros de sujeción de catarina.

La carga equivalente en cada perno es 5695.5 N y asumiendo un porcentaje de carga de impacto de 50%, el diagrama de cuerpo libre del perno queda:

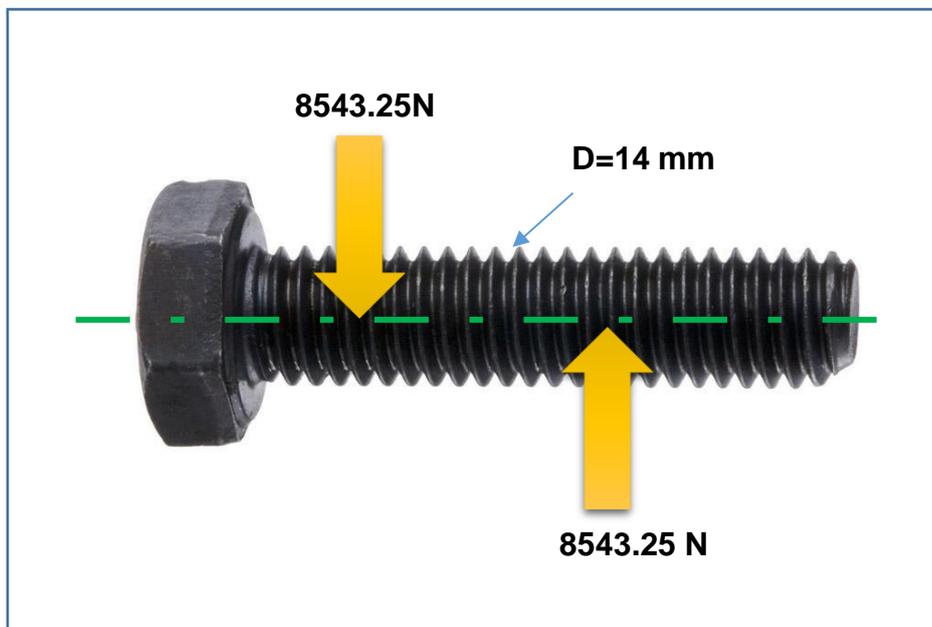


Figura 3.30, DCL del perno de acople al cuerpo.

Tenemos:

$$\tau_{perno} = \frac{4 * F}{\pi * d_2^2}$$

$$\tau_{perno} = \frac{4 * 8543.25}{\pi * 0.014^2}$$

$$\tau_{perno} = 55.50 \text{ MPa}$$

Según la teoría de la máxima energía de distorsión:

$$S_{sy} = 0.577 * S_y$$

Material del perno: Acero al carbono, templado y revenido, Grado 8.8, con esfuerzo de prueba $S_y = 600 \text{ MPa}$ (Anexo A.18).

$$S_{sy} = 0.577 * (600)$$

$$S_{sy} = 346.20 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad de cada perno es:

$$F.S = \frac{346.20}{55.50} = 6.23$$

Este factor de seguridad se encuentra por encima del valor recomendado para molinos de bolas.

3.7.17. Análisis de soldadura

El análisis de soldadura, se aplica a los elementos de unión más críticos, mostrados en los puntos E y F, para lo cual trabajaremos con las cargas máximas aplicadas en dichos puntos a los cuales estará sometido la soldadura: **(Shigley, 2008)**.

- Momento flexionante: 9666.73 N.m

- Momento Torsor: 22385 N.m

La sección para la soldadura será de filete, y el tamaño de la soldadura para espesores más de 1/2 pulg hasta 3/4 pulg, debe ser de 1/4 (6.35 mm). (Ver Anexo A.21)

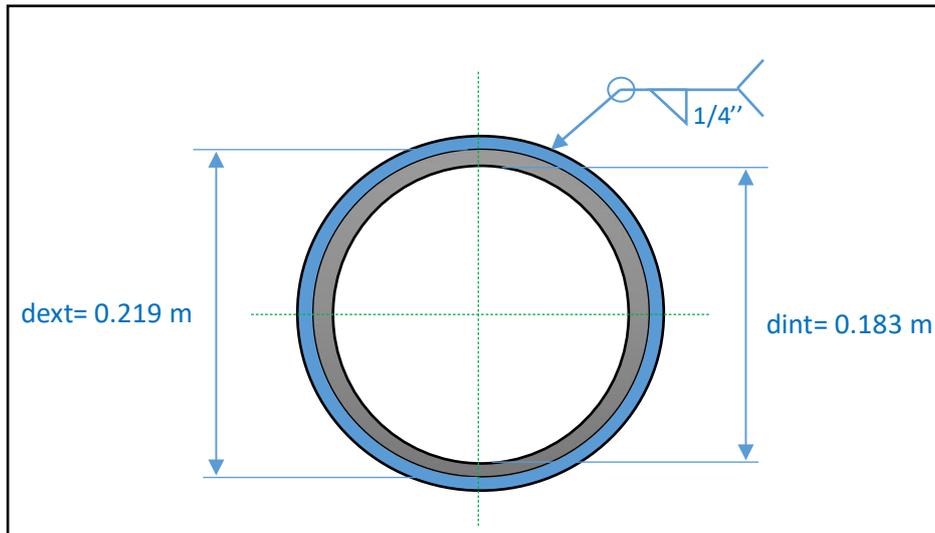


Figura 3.31, Soldadura de filete.

Esfuerzo por flexión:

De la tabla de propiedades a flexión (Anexo A.22), determinamos el momento de Inercia unitario:

$$I_u = \pi * r^3$$

$$I_u = \pi * \left(\frac{0.219}{2}\right)^3$$

$$I_u = 4.125 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

Se procede a calcular el momento de Inercia basado en la garganta de la soldadura:

$$I = 0.707 * h * I_u$$

$$I = 0.707 * (6.35 * 10^{-3})(4.125 * 10^{-3})$$

$$I = 1.852 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

El momento flexionante producido en la soldadura, por flexión es:

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

Reemplazando:

$$\sigma_{\max} = \frac{9666.73 * \left(\frac{0.219}{2}\right)}{1.852 * 10^{-5}}$$

$$\sigma_{\max} = 57.15 \text{ MPa}$$

Esfuerzo por torsión:

De la tabla de propiedades a torsión (Anexo A.23), determinamos el momento polar unitario:

$$J_u = 2 * \pi * r^3$$

$$J_u = 2 * \pi * \left(\frac{0.219}{2}\right)^3$$

$$J_u = 8.25 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

Se procede a calcular el momento polar basado en la garganta de la soldadura:

$$J = 0.707 * h * J_u$$

$$J = 0.707 * (6.35 * 10^{-3}) * (8.25 * 10^{-3})$$

$$J = 3.704 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

El momento torsor producido en la soldadura, por torsión es:

$$\tau = \frac{T * C}{J}$$

Reemplazando:

$$\tau = \frac{22385 * \left(\frac{0.219}{2}\right)}{3.70 * 10^{-5}}$$

$$\tau = 66.25 \text{ MPa}$$

Una vez obtenidos los componentes de esfuerzo torsor (τ) y el esfuerzo flexionante (σ_{\max}) para la soldadura, se puede combinarlas utilizando un diagrama de circulo de Mohr, para evaluar el esfuerzo cortante máximo:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{57.15}{2}\right)^2 + (66.25)^2}$$

$$\tau_{\max} = 72.15 \text{ MPa}$$

Considerando un electrodo E7018 1/8", cuyo esfuerzo de fluencia es de 331 MPa, además considerando una eficiencia de soldadura igual al 90%, se obtiene el siguiente factor de seguridad, por la teoría de falla del máximo esfuerzo cortante: (Anexo A.24)

$$n = \frac{S_{Sy} * E_S}{\tau_{\max}} = \frac{0.5 S_y}{\tau_{\max}}$$

$$n = \frac{0.5 * 0.90 * 331 \text{ MPa}}{72.15 \text{ MPa}} = 2.06$$

Nota: según la AWS el factor de seguridad para soldaduras sometidas a flexión y torsión es 1.44, por lo tanto, el factor de seguridad de 2.06 es aceptado.

3.8. Modelo en Solidworks del molino de bolas

El modelo propuesto, considera todo el cuerpo cilíndrico, ejes y bridas como un solo sólido. Asimismo, se consideró el momento torsor y carga de la catarina en el lugar donde se instalará la catarina. A continuación, se muestran los resultados, para un mallado con 4 puntos jacobianos con elementos cuadráticos de alto orden.

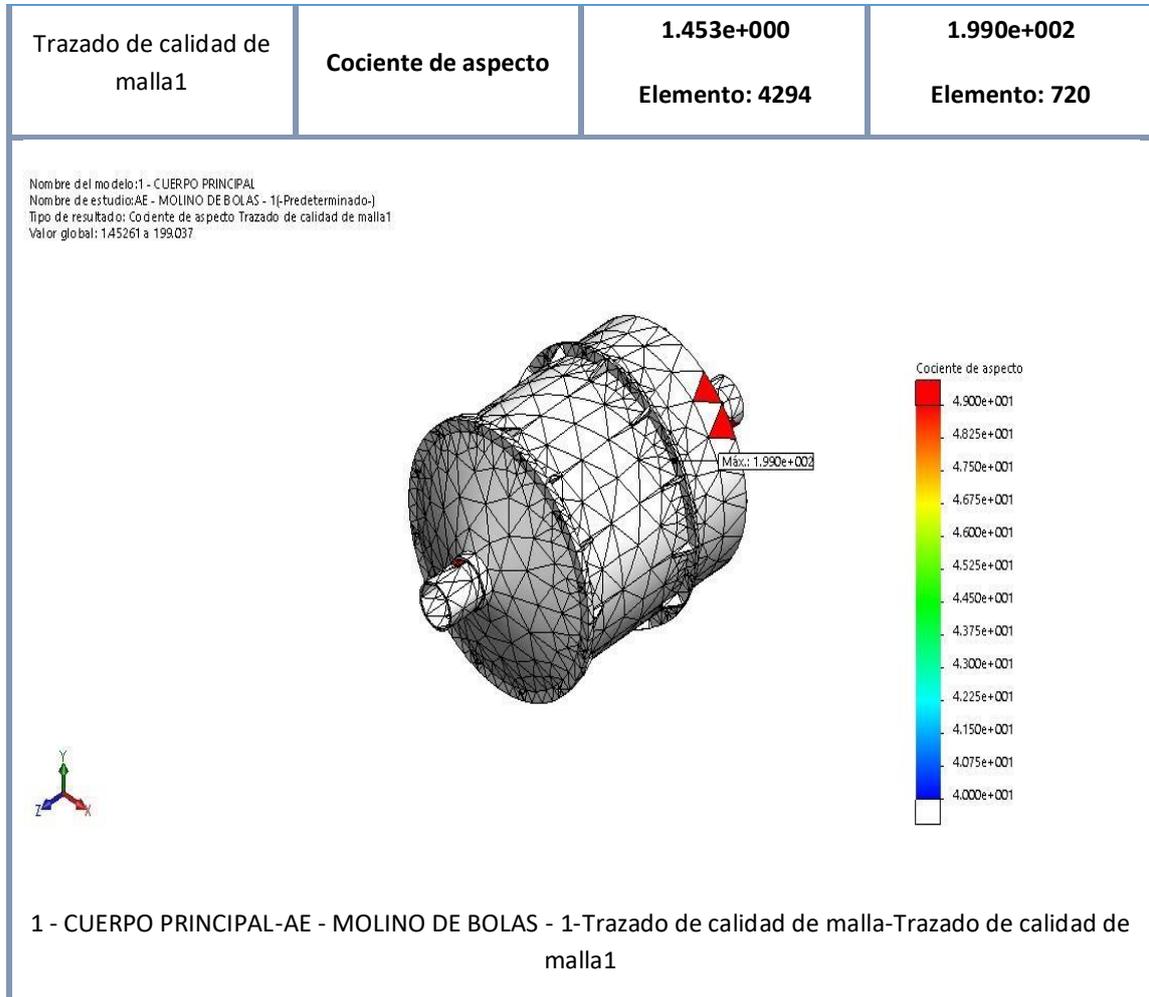


Figura 3.32, Mallado del cuerpo cilíndrico del molino de bolas en Solidworks.

El esfuerzo de Von mises mayor, se encuentra en la misma zona que en nuestra evaluación en secciones anteriores, siendo este el punto “B”. El valor del esfuerzo máximo es menor en el modelo, debido a que en Solidworks se le agregó una placa de refuerzo y cartelas para rigidizar la tapa del lado B. La deformación del molino de bolas es aceptable se encuentra por debajo de 1 mm. El factor de seguridad en el modelo es de 2.56 en el punto B, sin embargo, mediante el cálculo manual, fue 2.25. En ambas el factor de seguridad es aceptable.

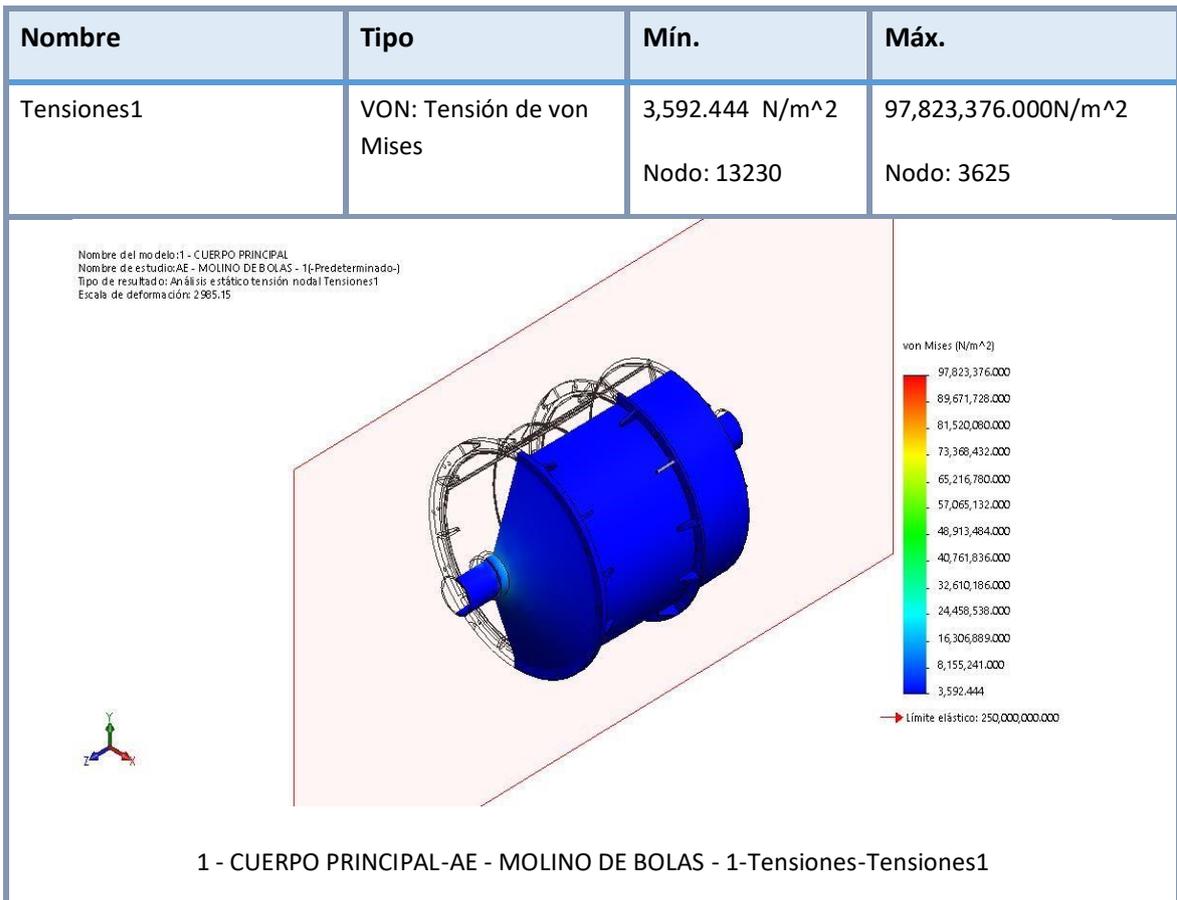


Figura 3.33, Esfuerzo de Von mises en el molino de bolas.

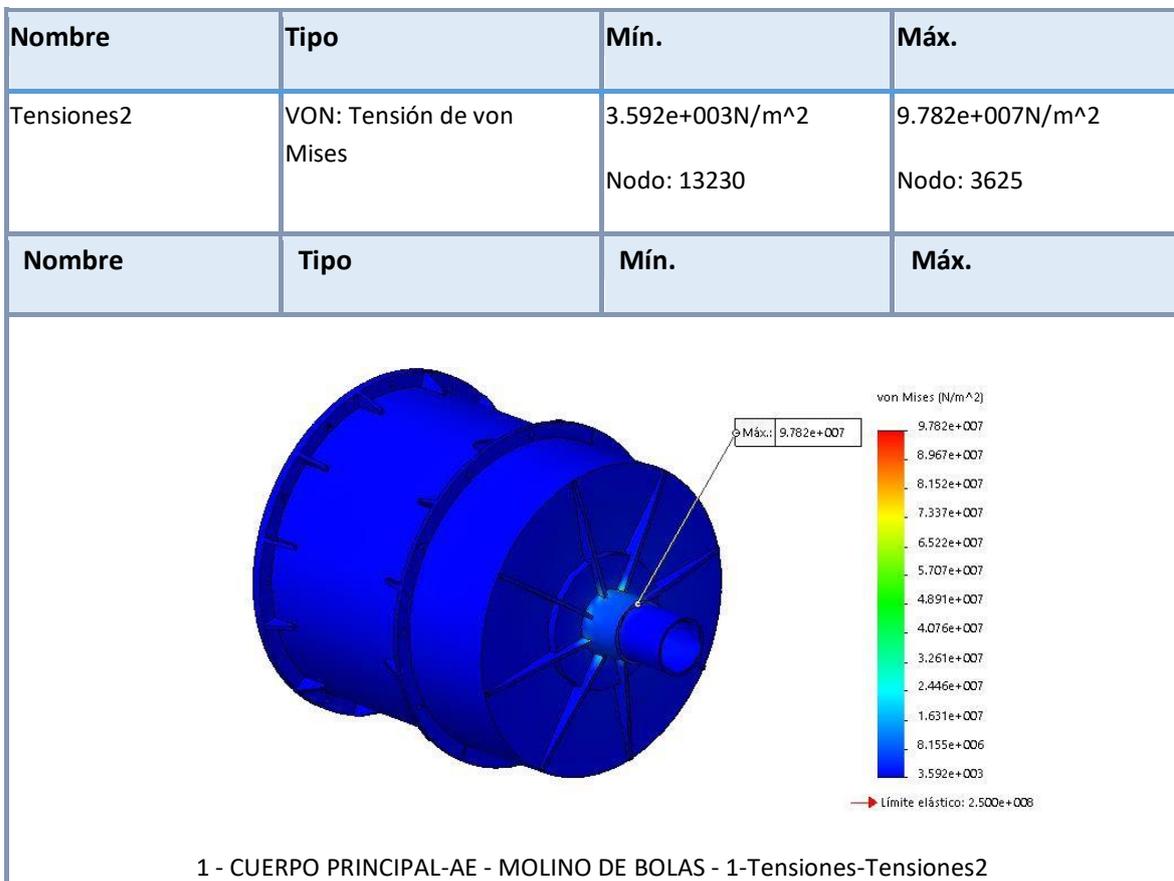


Figura 3.34, Esfuerzo de Von mises en el molino de bolas.

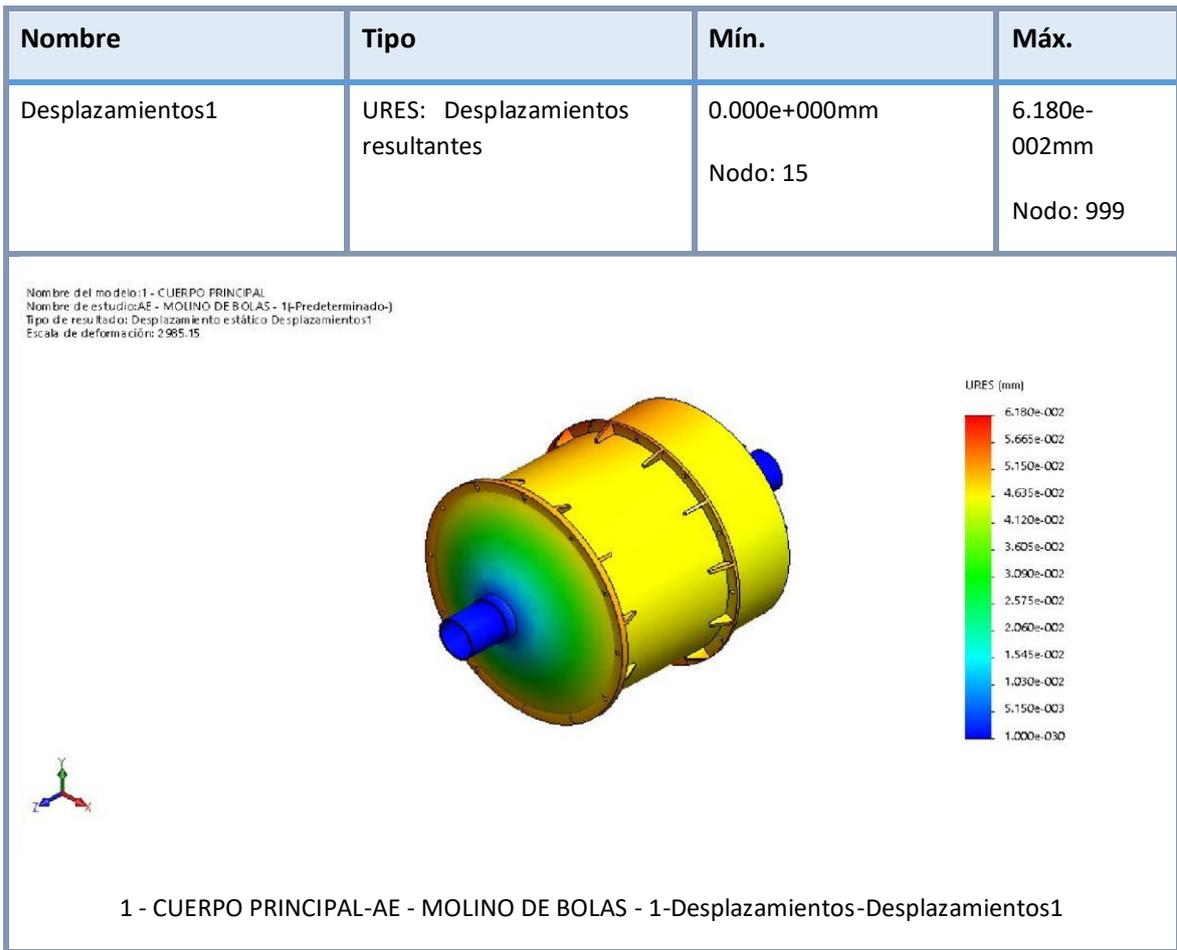


Figura 3.35, Desplazamientos del molino de bolas.

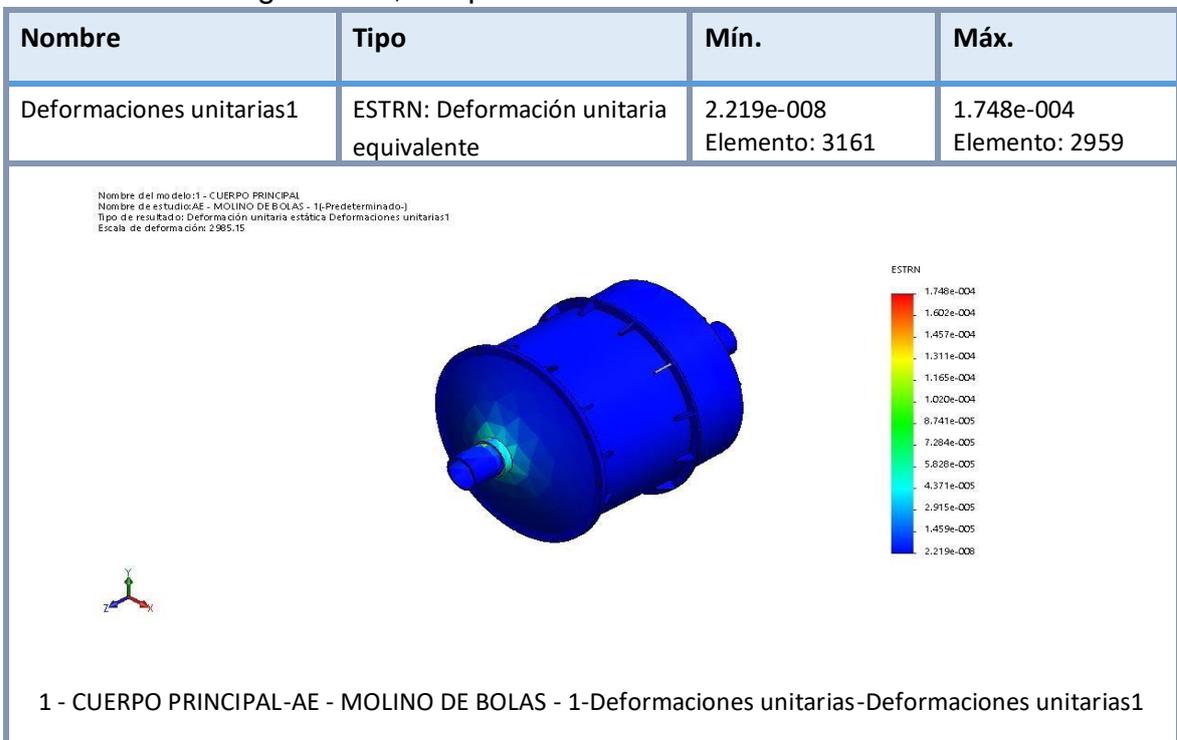


Figura 3.36, Deformación unitaria del molino de bolas.

Tiempo de operación al año	8760 h/año
-----------------------------------	------------

Costo de energía eléctrica con molino de martillos (CMM)

$$\begin{aligned} & \text{s./} \\ \text{CMM} &= 450\text{KW} * 0.26 \frac{\text{s.}}{\text{año}} * 8760 \text{ h/año KWh} \\ & \text{S./} \\ \text{CMM} &= 1024920 \frac{\text{S.}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Costo de energía eléctrica con molino de bolas (CMB)

$$\begin{aligned} & \text{s./} \\ \text{CMB} &= 165.78 \text{ KW} * 0.26 \frac{\text{s.}}{\text{año}} * 8760 \text{ h/año KWh} \\ & \text{S./} \\ \text{CMB} &= 377580.5 \frac{\text{S.}}{\text{año}} \end{aligned}$$

En comparación, el molino de bolas, tendrá un menor costo en consumo de energía eléctrica que el molino de martillo en operación

Costo de inversión de fabricación de molino de bolas

A continuación, se presenta una tabla con los costos aproximados de cada miembro estructural, tomar en cuenta que los costos varían constantemente, y se recomienda recalcular esta sección.

Costo de materiales

Estos valores no incluyen el costo de transporte al taller de fabricación.

Tabla N°3.9, Costo aproximado de materiales.

Material	Ancho	Largo	Altura	Área	Peso	Costo unit+IGV	sub total
	mm	mm	mm	m ²	Kg	\$	\$
Motor Trifásico Asíncrono – Siemens 315L – 1LG6 318 6AA L2X, 200KW, 1195 RPM, 60Hz, 440V	610	1402	815	----	1245.00	8000.00	8000.00
Reductor – Siemens 2KJ1511 QU13 A1 , 109 RPM, i=11.2	988	565	715	----	1610.32	2000.00	2000.00
Carcaza y tapas de ASTM A-36, 1 plancha Formato: 20'x5'x5/8".	1500	6000	15.88	9	1121.57	2600.00	2600.00
Bolas de acero forjado 5in,4in, 3in y 2in	----	----	----	----	1434.00	1291.00	1291.00
Eje de transmisión, 1 tubo ASTM A53 Grado B sin costura SCH 120, Formato: 10"	219	5000	219	0.550	435.00	1500.00	1500.00

Piñón, 16.33 in	----	----	----	----		1200.00	1200.00
Catarina, 49.69 in	----	----	----	----		500.00	500.00
Sistema de rodamientos de bolas de SKF 61940 MA, 200mm	----	----	----	----	----	1500.00	3000.00
Pernos hexagonales ASTM Grado 144, 3/16 in	----	----	----	----	----	1.11	160.00
Cadenas de transmisión ANSI 240, 4 Torones	----	----	----	----	----	300.00	300.00
Planchas de acero para revestimiento ASTM A36, Formato: 20'x5'x3/16"	1500	6000	4.76	----	336.29	750.00	750.00
Planchas de acero para guarda ASTM A36, Formato: 20'x5'x3/16"	1500	6000	4.76	9	336.29	750.00	750.00
Epoxy- amina cicloalifatica	----	----	----	----	----	139.90	139.90
Total				18.55			22190.90

Costo de consumibles

Tabla N°3.10, Costo aproximado de consumibles.

Consumible	Cantidad	Costo unitario	sub total
	(definido)	s/	s/
Electrodo E6011	2 Kg	11.25	22.50
Electrodo E7018	18 Kg	13.00	234.00
Discos de corte 4.5"	6 unidades	3.50	21.00
Disco de corte 9"	25 unidades	10.90	272.50
Disco de corte 14"	1 Unidades	166.00	166.00
Disco de desbaste 4.5"	6 Unidades	3.90	23.40
O2	1 botella 10 Kg	116.96	116.96
C2H2	1 botella 7 Kg	325.10	325.10
Otros	-	-	100.00
		Total	1281.46
		Total en dólares	400.46

Costo de mano de obra

Dentro de los costos de mano de obra se incluyen el del encargado de supervisar la seguridad en el trabajo, para evitar daños tanto materiales como humanos. Los costos de cada personal son acordes al mercado laboral local. El contrato con el personal sería hasta terminar la fabricación y montaje programada para 15 días. Esto no incluye costos de viáticos y de equipos de protección personal.

Tabla N°3.11, Costo aproximado de Mano de obra.

Personal	Cantidad	Costo unit	Costo total (15 Días)
		s/xmes	s/
Ingeniero supervisor	1	2500.00	1250
SSOMA	1	2000.00	1000.00
Maestro de obra	1	90.00	1350.00
Soldador	1	75.00	1125.00
Oficial montajista	1	75.00	1125.00
Ayudante	1	55.00	825.00
Ganancia del contratista del 50 %		SCTR	193.80

	Total	10303.20
	Dólares	3219.75

Costo de transporte

Este costo incluye el transporte desde el proveedor de materiales hasta el traslado de la estructura para ensamblar en obra.

Tabla N°3.12, Costo aproximado de transporte

Actividad	Cantidad	Costo unit	Costo (25 Días)
	Definido	s/	s/
Transporte de materiales al taller de fabricación	3 viajes	250	750.00
Transporte a la zona de montaje	1 viajes	700	700.00
Camión grúa	1 horas	100	100.00
		Total	1550.00
		Dólares	484.00

Costo total de inversión en fabricación y montaje

Este costo incluye el transporte desde el proveedor de materiales hasta el traslado de la estructura para ensamblar en obra.

Tabla N°3.13, Costo aproximado de inversión en fabricación y montaje.

Costo	Total
	\$
Materiales	22190.90
Consumibles	400.46
Mano de obra	3219.75
Transporte	484.00
	26295.11

Costo de mantenimiento del molino de bolas

Los costos de mantenimiento usualmente son de interés del cliente, sin embargo, debido a no conocer el costo de mantenimiento del molino actualmente en funcionamiento, se igualarán los costos. El tiempo de vida útil se considera de 10 años.

Tabla N°3.14, Costo aproximado de mantenimiento.

Actividad	Periodo de tiempo	Costo unit
		\$
Cambio de Catarina y piñón	1 año y 5 meses	2500.00
Cambio de rodamientos	2 años	3000.00
Mantenimiento preventivo de reductor de velocidad	1 año	450.00
Pintura	5 años	500.00

Cambio del 50% de revestimiento interior	5 años	4500.00
Cambio del 2% de bolas para el molino.	1 año	800.00
Engrase de transmisión mecánica	6 meses	35.00

3.11. Beneficio económico

Si se desea producir una misma potencia con la misma caldera, pero considerando la opción actual de molienda de carbón y la otra, con el molino de bolas. Esto es determinar la inversión adicional en combustible para producir la misma cantidad de energía en la caldera.

El costo de combustible por año neto que representa beneficio para la empresa.

$$B = C_{\text{carbón, anual}} = \dot{m}_{\text{carbón}} * C_{\text{carbón}} * t_{\text{antracita}}$$

$$B = C_{\text{carbón, anual}} = (12000 - 10943.15) \frac{t}{\text{horas}} * 45 \frac{\text{U}\$}{t} * 7920 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

$$B = 376\ 661.34 \frac{\text{U}\$}{\text{anual}}$$

3.12. Análisis Financiero

- la entidad bancaria seleccionada para la evaluación es: BCP (Banco de Crédito del Perú)

Datos:

- Tasa de préstamo: 14%
- Periodo del préstamo: 10 años
- Inversión económica: 26295.11 U\$\$
- Beneficio máximo logrado: 376 661.34U \$\$/año

En la tabla 3.9, se detallan los valores correspondientes a las herramientas financieras VAN y TIR, los cuales resultaron viables para el estudio del diseño del molino de bolas.

Neto	-26295.11	257347.43	249347.43	257347.43	251347.43	249847.43	251847.43	254847.43	251347.43	257347.43	255167.43
-------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

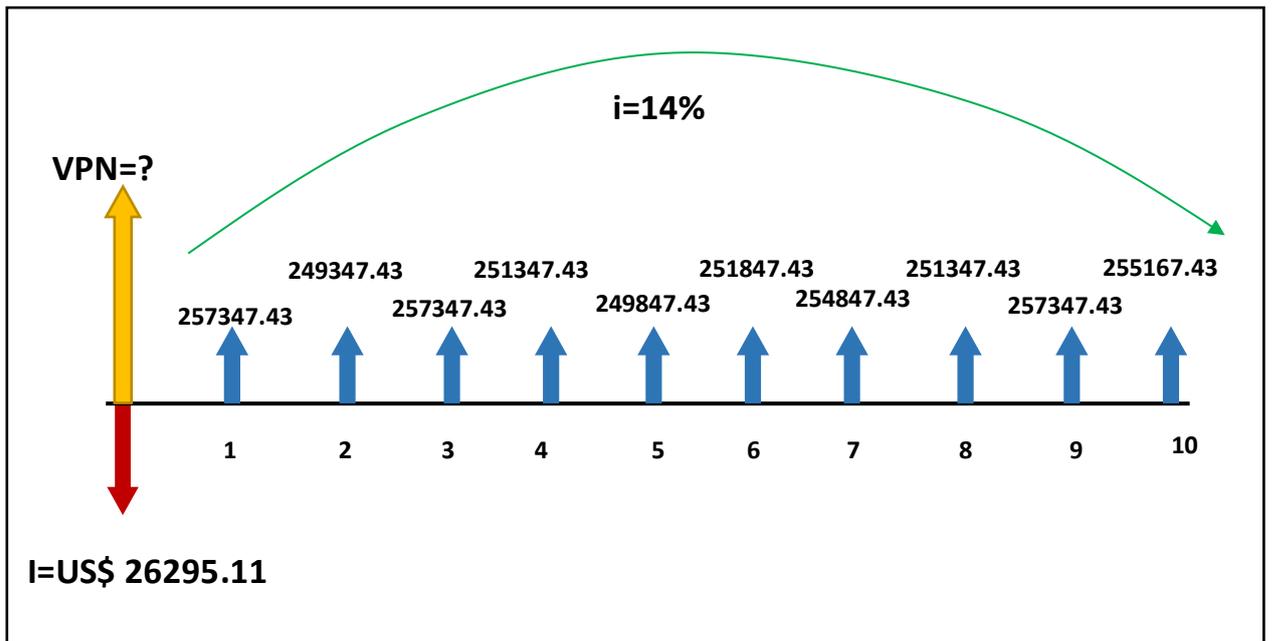


Figura 3.37, Flujo de efectivo.

Tabla N°3.16, Flujo de efectivo, VAN y TIR.

AÑO	FLUJO (US\$)	TIR (%)
0	\$ -26,295.11	0.00%
1	\$ 257,347.43	878.69%
2	\$ 249,347.43	967.52%
3	\$ 257,347.43	975.34%
4	\$ 251,347.43	976.04%
5	\$ 249,847.43	976.10%
6	\$ 251,847.43	976.11%
7	\$ 254,847.43	976.11%
8	\$ 251,347.43	976.11%
9	\$ 257,347.43	976.11%
10	\$ 255,167.43	976.11%
VAN (US\$)		\$1,296,259.14
TIR (%)		976.11%

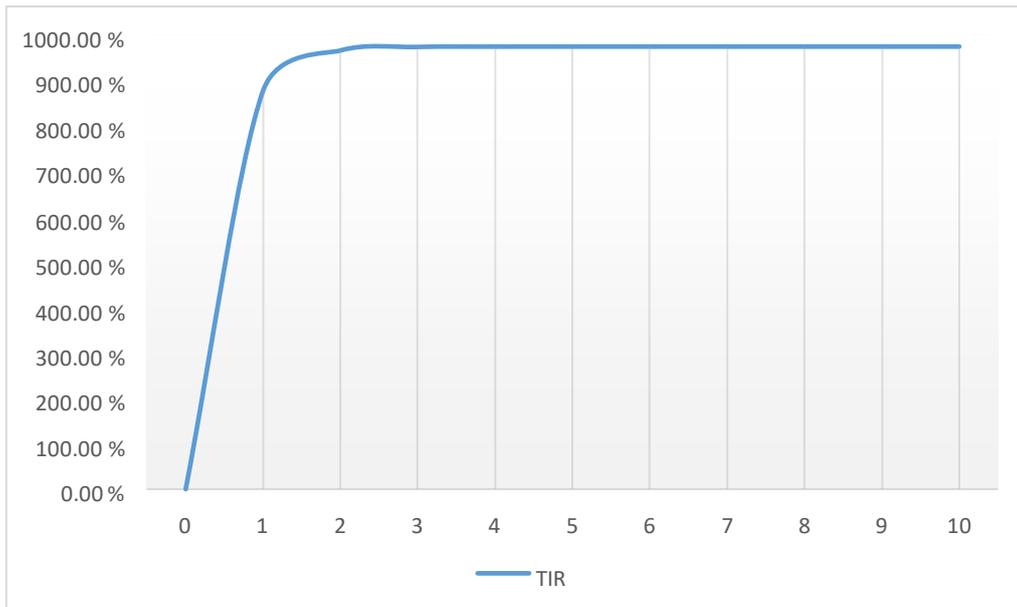


Figura 3.38, Gráfica de la TIR a lo largo del desarrollo del proyecto.

3.13. El retorno de la inversión

El retorno operacional de la inversión, sería:

$$\text{R.O. I} = \frac{\text{B} - \text{I}}{\text{I}}$$

El presente proyecto, en la actualidad tiene una pérdida económica de $376\,661.34 \frac{\text{U}\$}{\text{año}}$, que con la implementación de un molino de bolas, este valor económico pasaría hacer un beneficio.

Reemplazando:

$$\text{R. O.I (año 1)} = \frac{\$ 249,347.43 \text{ U}\$}{26,295.11 \text{ U}\$} = 9.48$$

$$\text{R. O.I (año 2)} = \frac{\$ 257,347.43 \text{ U}\$}{26,295.11 \text{ U}\$} = 9.80$$

Implementar este molino de bolas entrega 9.48 veces más de lo invertido en el año de menor beneficio (año 2) y en el año de mayor beneficio 9.80 veces más de lo invertido.

3.14. Periodo de retorno de la inversión

El periodo de retorno de la inversión, valor indica en cuantos años el proyecto devolvería el capital sin entregar ganancias.

$$n = \frac{\log\left(1 - \frac{I * i}{A}\right)}{\log(1 + i)} = 0.114 \text{ años}$$

$$n = \frac{\log\left(1 - \frac{26295.11 * 0.14}{257347.43}\right)}{\log(1 + 0.14)} = 0.114 \text{ años}$$

El periodo de retorno de la inversión sin considerar ganancias es de 41 días.

IV. DISCUSIÓN

4.1. El diseño del molino de bolas se llevó a cabo en orden, considerando teorías válidas y probadas de modo que se pudo obtener un diseño conciso y confiable. Cada parámetro que se evaluó y las dimensiones que se obtuvieron están en función del flujo del carbón antracítico necesario para alimentar el hogar de la caldera acuotubular, esto es 12 TM/h; sin embargo, no siendo la misma producción de carbón evaluada por el investigador Alcántara (1.81 TM/H), se puede inferir que el molino de bolas es un método de pulverización eficiente, a pesar de que este método de molienda se utiliza con mayor frecuencia en la industria de procesamiento de mineral.

4.2. El rendimiento de la caldera aumenta considerablemente según la evaluación realizada en esta tesis al cambiar el molino de martillos por un molino de bolas. Manifestándose como un aumento del beneficio frente al costo, afirmando lo concluido por el investigador Real.

4.3. El modelo del molino de bolas en SolidWorks fue fundamental para el estudio de resistencia de los componentes de la transmisión mecánica (ejes, chavetas y soportes), ya que nos ahorra el tedioso cálculo repetitivo hasta encontrar las dimensiones de estos elementos que soporten las solicitaciones de cargas en operación. Por ende, se confirma que las herramientas computacionales CAD-CAE son fundamentales en el proceso del diseño mecánico, así como Grueso y Herrera concluyen tras una evaluación de los softwares de ingeniería para el diseño.

4.4. Concluyendo, que las herramientas computacionales CAD, fueron de gran importancia al momento de evaluar cada una de las soluciones que se plantearon dentro del desarrollo de este trabajo. El apoyo en la teoría de elementos finitos (Algor, Ansys), las modelaciones 3D (Solid-Edge, Solid Works, Visual Nastran),

modelaciones 2D (Working Model) resultaron importantes al momento de tomar decisiones en la selección de piezas, materiales, mecanismos y demás elementos constituyentes del modelo puesto en consideración en este escrito. Estas herramientas se convierten de gran ayuda para el diseño con la que cuentan los ingenieros en la actualidad, ya que permiten predecir de manera muy cercana a la realidad el comportamiento de los materiales, permitiendo un ahorro de tiempo, dinero y brindando mayor confiabilidad a los diseños.

V. CONCLUSIÓN

5.1. Se evaluó las condiciones actuales del caldero acuotubular TSX-G, encontrando una temperatura de combustión de 1020°C, la cual supera a la temperatura máxima permitida de 850°C. También se puede concluir que con tamaños de molienda de 75 mm del carbón antracita abastecido al caldero este posee una eficiencia de 55.72%.

5.2. Se plantearon las características y especificaciones para el diseño, generando 3 conceptos de diseño del molino de bolas, concluyendo que el diseño óptimo, fue la solución 01, la cual posee un sistema de rotación de transmisión por cadenas, seleccionando la cadena ANSI 240 de 4 torones, con un factor de diseño de 1.3. Estas características se plasmaron en una lista de exigencias y se identificó las funciones como parte de la selección del diseño óptimo mediante abstracción conceptual del equipo.

5.3. Se realizó el diseño del molino de bolas óptimo, con un diámetro de 1000mm y una longitud de 1000 mm de acero comercial ASTM A-36, con un consumo específico de 13.81KWh/TM, con un motor Siemens 315L-1LG44-318-6AA de 200KW con una velocidad de rotación de 1200RPM y un reductor de velocidad Siemens 2KJ1511-QU13-A1 de relación 12.1. Con una velocidad requerida para la pulverización es de 35.36 RPM. Las bolas son de acero con un peso de 1434 Kg de tamaños de 5, 4, 3, 2 pulg. Para la transmisión fue necesario seleccionar una cadena ANSI 240, de 4 torones. El diseño del eje transmitido del molino de bolas, de material ASTM A53 grado B sin costura, con un diámetro nominal de 8 pulgadas SCH 120, al cual se le realizará maquinado para que el diámetro sea 200. Se obtuvo un factor de seguridad de 2.24. Se seleccionaron rodamientos SKF de designación 61940 MA, 6040 y 6320. El recubrimiento del cilindro contara con 18 placas ASTM A36 de 4.76 mm de espesor, con 144 pernos de 3/16 pulgadas. La catarina comunicará el movimiento al cuerpo cilíndrico mediante 12 pernos M14 y soldadura de tope para las uniones con electrodos E6018 de 1/4 pulgadas de garganta, obteniendo un factor de seguridad máximo de 2.06.

5.4. Se realizó el modelo en Solidworks y se simuló las condiciones de operación, en donde el factor de seguridad en el modelo es de 2.56 en el punto B, sin embargo, mediante el cálculo manual, fue 2.25. En ambas el factor de seguridad es aceptable.

5.5. Se recalculo el rendimiento energético del caldero acuotubular TSX-G, encontrando un rendimiento energético de 58.72%, manifestando en un uso más eficiente del carbón antracita. 5.5. Se realizó un análisis económico encontrando un beneficio de 376 661.34 _____ U\$\$,

anual con una inversión de 26295.00 U\$\$, lo que conlleva a un retorno de la inversión de hasta más de 9 veces el valor de la inversión.

5.6. Se concluye que la viabilidad del presente proyecto desde el punto de vista financiero es muy viable con un TIR de 976.11% y un VAN 1,296,259.14 US\$.

VI. RECOMENDACIONES

6.1. Es necesario inmediatamente después de ser aprobada la propuesta por el cliente, considerar ductos de entrada de aire precalentado para que el carbón se precaliente antes de ingresar al hogar de la caldera y extraiga la humedad del mismo.

6.2. Se recomienda realizar un análisis de cimentación y aislamiento para evitar la transmisión de vibración a otros equipos.

6.3. Se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la operación del molino de bolas. Además, se deberá capacitar al personal que operará este equipo en mantenimiento preventivo y predictivo básico de modo que se eviten mantenimientos correctivos.

6.4. Es necesario capacitar al personal de operación de calderas, para la nueva tecnología a instalar y utilizar en la operación del molino de bolas.

6.5. Evaluar qué tipo de empaque debe llevar en la unión bridada entre el cuerpo cilíndrico y la descarga cónica; cabe mencionar que en las tolvas de ceniza se usa fibra cerámica.

6.6. Se recomienda realizar un estudio de la velocidad del desgaste de las placas del revestimiento y los tubos de entrada y salida.

6.7. Es necesario contar con un variador de velocidad para tener control adicional de la velocidad de rotación del molino de bolas.

VII. REFERENCIAS

- [1] **Bustamante. 2015.** Documentos . *Molino de bolas* . [En línea] Adwords , 11 de Julio de 2015. [Citado el: 28 de Abril de 2016.] <http://documents.mx/documents/disenodeunmolinodebolas.html>.
- [2] **Fernández, Pedro Diez. 1996.** *Centrales Térmicas* . España : Publicaciones cantabria , 1996. 8489586128.
- [3] **Hernando. 2011.** Universidad Nacional Abierta y a Distancia . *Maquinaria y equipos de alimento*. [En línea] Programa de Ingeniería de Alimentos , 1 de Agosto de 2011. [Citado el: 20 de Abril de 2016.] http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/exelarning/leccin_17_molinos_de_bolas.html.
- [4] **Jhon W. Schlanz. (1987)** "Grinding: an Overview of operation and design" pp 25 North Caroline State University. ISBN: 7516(99)00029.
- [5] **Kenneth Wark y Donal Richards. 2001.** *Termodinámica* . Madrid : Concepción , 2001. 844812829.
- [6] **Niels, C. 2016.** Conminución de materiales . [En línea] 1 de Enero de 2016. [Citado el: 5 de Octubre de 2016.] http://www.academia.edu/8566332/conminuci%C3%93n_de_minerales.
- [7] **Renovetec. 2014.** Caldera para Biomasa . *Caldera de lecho Fluidizado* . [En línea] 15 de Febrero de 2014. [Citado el: 5 de Mayo de 2016.] <http://www.renovetecingenieria.com/biomasa/calderasbiomasa.html>.
- [8] **Rodas. 2011.** Monografías . *Tecnología del molino de bolas*. [En línea] Publicaciones y Recursos Educativos, 10 de Enero de 2011. [Citado el: 15 de Abril de 2016.] <http://www.monografias.com/trabajos37/molino-de-bolas/molinode-bolas.shtml>.
- [9] **Siemens. 2008.** Catalodo de Motores Trifasicos Asincronos. [En línea] 1 de

Enero de 2008. [Citado el: 7 de Octubre de 2016.]

https://w3.siemens.no/home/no/no/sector/industry/automation/drives/Documents/D81-1_1008_English.pdf.

[10] **Shigley. 2006.** *Mechanical Engineering Design*. United States of America : McGraw–Hill Primis, 2006. 0390764876.

[11] **Skf. 2016.** SKF Bearing Calculator. *Herramienta SKF para el cálculo de rodamientos*. [En línea] 1 de Enero de 2016. [Citado el: 7 de Mayo de 2016.] <http://www.skf.com/es/knowledge-centre/engineeringtools/skfbearingcalculator.html>.

[12] **Sowell, Tomas. 2013.** *Economía Basica* . España : Deusto SA, 2013. 9788423412648.

[13] **Thomas, A; Filippov, L.O. (1999).** "Fractures, fractals and breakage energy of mineral particles". *International Journal of Mineral Processing* 57 (4): 285. ISBN:10.1016/S0301

ANEXOS

A.1. Fichas de registro

Ficha de registro de la Caldera Acuotubular China TSXG de la Empresa Trupal S.A		
Parámetro de operación	Resultado	Unidad
Flujo másico de vapor sobrecalentado		
Presión de servicio del vapor sobrecalentado		
Temperatura de servicio del vapor saturado		
Entalpia del vapor sobrecalentado		
Temperatura del agua de alimentación		
Entalpia del agua de alimentación		
Temperatura del aire de combustión		
Entalpia del aire de combustión		
Flujo másico de médula de bagazo		
Poder calorífico de la médula de bagazo		
Flujo másico de carbón antracita		
Poder calorífico del carbón antracita		
Exceso de aire		
Ratio de combustión de la mezcla		
Tamaño del carbón antracita		
Tiempo promedio de operación del caldero		

Ficha de registro – Costos de energía eléctrica, costos de combustible y producción de energía eléctrica		
Parámetro de operación	Resultado	Unidad
Costo unitario de la médula de bagazo		
Costo unitario del carbón antracita		
Potencia producida por el turbogenerador		
Potencia comprada al SEIN		
Potencia total consumida por la planta		
Costo unitario de energía eléctrica con T.G		
Costo unitario de energía eléctrica con SEIN		

A.2. Resultados de las fichas de registro

Ficha de registro de la Caldera Acuotubular China TSXG de la Empresa Trupal S.A		
Parámetro de operación	Resultado	Unidad
Flujo másico de vapor sobrecalentado	90 (90000)	TM/h Kg/h
Presión de servicio del vapor sobrecalentado	70 (71)	barg bar @
Temperatura de servicio del vapor saturado	490	°C
Entalpia del vapor sobrecalentado	3385.84	KJ/Kg
Temperatura del agua de alimentación	104	°C
Entalpia del agua de alimentación	436.05	KJ/Kg
Temperatura del aire de combustión	22	°C
Entalpia del aire de combustión	22.154	KJ/Kg
Flujo másico de médula de bagazo	11.73 (11730)	TM/h Kg/h
Poder calorífico de la médula de bagazo	17075	KJ/Kg
Flujo másico de carbón antracita	12.00 (12000)	TM/h Kg/h
Poder calorífico del carbón antracita	23012	KJ/Kg
Exceso de aire	88.30	%
Ratio de combustión de la mezcla $\text{Ratio} = \frac{(e + 1) * 6.383(0_2 + 3.76 N_2)}{100}$ $\text{Ratio} = \frac{(0.883 + 1) * 6.383(32 + 3.76 * 28)}{100}$	16.50	Kga/Kgc
Tamaño del carbón antracita	15 - 75	mm
Tiempo promedio de operación del caldero	7300	Horas/año

Ficha de registro – Costos de energía eléctrica, costos de combustible y producción de energía eléctrica		
Parámetro de operación	Resultado	Unidad
Costo unitario de la médula de bagazo		S. /TM
Costo unitario del carbón antracita		S. /TM
Potencia producida por el turbogenerador		MW
Potencia comprada al SEIN		MW
Potencia total consumida por la planta		MW
Costo unitario de energía eléctrica con T.G		\$/KW-h
Costo unitario de energía eléctrica con SEIN		\$/KW-h

A.3. Entalpia y temperatura de combustión en calderas acuotubulares

CARBON CON H/C= 0.050 %CO2 EN ORSAT= 8.00%

PESO MOLECULAR DE HUMOS HUMEDOS=29.502

t(C)	T(K)	T(R)	h(Btu/lb)	h(kcal/kg)	h(kJ/kg)
610.00	883.15	1589.67	282.3	156.8	656.5
620.00	893.15	1607.67	287.2	159.6	668.1
630.00	903.15	1625.67	292.2	162.3	679.7
640.00	913.15	1643.67	297.2	165.1	691.3
650.00	923.15	1661.67	302.2	167.9	702.9
660.00	933.15	1679.67	307.2	170.7	714.6
670.00	943.15	1697.67	312.2	173.5	726.3
680.00	953.15	1715.67	317.3	176.3	738.0
690.00	963.15	1733.67	322.3	179.1	749.7
700.00	973.15	1751.67	327.4	181.9	761.4
710.00	983.15	1769.67	332.4	184.7	773.2
720.00	993.15	1787.67	337.5	187.5	785.0
730.00	1003.15	1805.67	342.6	190.3	796.8
740.00	1013.15	1823.67	347.7	193.1	808.6
750.00	1023.15	1841.67	352.7	196.0	820.5
760.00	1033.15	1859.67	357.9	198.8	832.4
770.00	1043.15	1877.67	363.0	201.7	844.3
780.00	1053.15	1895.67	368.1	204.5	856.2
790.00	1063.15	1913.67	373.2	207.3	868.1
800.00	1073.15	1931.67	378.4	210.2	880.1
810.00	1083.15	1949.67	383.5	213.1	892.1
820.00	1093.15	1967.67	388.7	215.9	904.1
830.00	1103.15	1985.67	393.8	218.8	916.1
840.00	1113.15	2003.67	399.0	221.7	928.1
850.00	1123.15	2021.67	404.2	224.6	940.2
860.00	1133.15	2039.67	409.4	227.4	952.3
870.00	1143.15	2057.67	414.6	230.3	964.4
880.00	1153.15	2075.67	419.8	233.2	976.5
890.00	1163.15	2093.67	425.0	236.1	988.6
900.00	1173.15	2111.67	430.2	239.0	1000.7
910.00	1183.15	2129.67	435.5	241.9	1012.9
920.00	1193.15	2147.67	440.7	244.8	1025.1
930.00	1203.15	2165.67	446.0	247.8	1037.3
940.00	1213.15	2183.67	451.2	250.7	1049.5
950.00	1223.15	2201.67	456.5	253.6	1061.7
960.00	1233.15	2219.67	461.7	256.5	1074.0
970.00	1243.15	2237.67	467.0	259.4	1086.2
980.00	1253.15	2255.67	472.3	262.4	1098.5
990.00	1263.15	2273.67	477.6	265.3	1110.8
1000.00	1273.15	2291.67	482.8	268.2	1123.1
1010.00	1283.15	2309.67	488.1	271.2	1135.4
1020.00	1293.15	2327.67	493.4	274.1	1147.8
1030.00	1303.15	2345.67	498.8	277.1	1160.1
1040.00	1313.15	2363.67	504.1	280.0	1172.5
1050.00	1323.15	2381.67	509.4	283.0	1184.8
1060.00	1333.15	2399.67	514.7	286.0	1197.2
1070.00	1343.15	2417.67	520.1	288.9	1209.6
1080.00	1353.15	2435.67	525.4	291.9	1222.1
1090.00	1363.15	2453.67	530.7	294.9	1234.5
1100.00	1373.15	2471.67	536.1	297.8	1246.9
1110.00	1383.15	2489.67	541.4	300.8	1259.4
1120.00	1393.15	2507.67	546.8	303.8	1271.9
1130.00	1403.15	2525.67	552.2	306.8	1284.4
1140.00	1413.15	2543.67	557.5	309.7	1296.9
1150.00	1423.15	2561.67	562.9	312.7	1309.4
1160.00	1433.15	2579.67	568.3	315.7	1321.9
1170.00	1443.15	2597.67	573.7	318.7	1334.4
1180.00	1453.15	2615.67	579.1	321.7	1347.0
1190.00	1463.15	2633.67	584.5	324.7	1359.5
1200.00	1473.15	2651.67	589.9	327.7	1372.1

A.4. Propiedades del vapor sobrecalentado y agua de alimentación de la caldera acuotubular

ChemicaLogic SteamTab Companion

About | Saturated | Superheated/Subcooled | Constants

Input:
 Temperature: 490
 Pressure: 71

Units:
 Metric/SI
 English

Close
Calculate

Property	Value	Unit
Temperature	490	°C
Pressure	71	bar
Steam quality	Indeterminate	%
Volume	0.0466674	m ³ /kg
Density	21.4282	kg/m ³
Compressibility factor	0.940748	dimensionless
Enthalpy	3385.84	kJ/kg
Entropy	6.76051	kJ/(kg. °C)
Helmoltz free energy	-2104.78	kJ/kg
Intemal energy	3054.5	kJ/kg
Gibbs free energy	-1773.45	kJ/kg
Heat capacity at constant volume	1.79224	kJ/(kg. °C)
Heat capacity at constant pressure	2.44334	kJ/(kg. °C)
Speed of sound	650.935	m/s
Coefficient of thermal expansion	0.00165681	1/°C
Isothermal compressibility	0.015015	1/bar

ChemicaLogic Corporation, 8 Cedar St. Ste 56, Woburn, MA 01801 Tel: 781-938-1151
 Copyright © 1999 ChemicaLogic Corporation. All rights reserved.

ChemicaLogic SteamTab Companion

About | Saturated | Superheated/Subcooled | Constants

Independent Variable:
 Temperature Value, °C: 104
 Pressure

Units:
 Metric/SI
 English

Close
Calculate

Phase:
 Vapor Liquid Two-phase

Property	Value	Unit
Temperature	104	°C
Pressure	1.16777	bar
Steam quality	0	%
Volume	0.00104664	m ³ /kg
Density	955.442	kg/m ³
Compressibility factor	0.000702184	dimensionless
Enthalpy	436.05	kJ/kg
Entropy	1.35217	kJ/(kg. °C)
Helmoltz free energy	-74.0448	kJ/kg
Intemal energy	435.928	kJ/kg
Gibbs free energy	-73.9225	kJ/kg
Heat capacity at constant volume	3.74745	kJ/(kg. °C)

ChemicaLogic Corporation, 8 Cedar St. Ste 56, Woburn, MA 01801 Tel: 781-938-1151
 Copyright © 1999 ChemicaLogic Corporation. All rights reserved.

A.5. Catalogo Siemens del motor eléctrico de accionamiento del molino de bolas

IEC Squirrel-Cage Motors

Standard motors up to frame size 315 L

Self-ventilated energy-saving motors with high efficiency – Cast-iron series 1LG6

Selection and ordering data (continued)

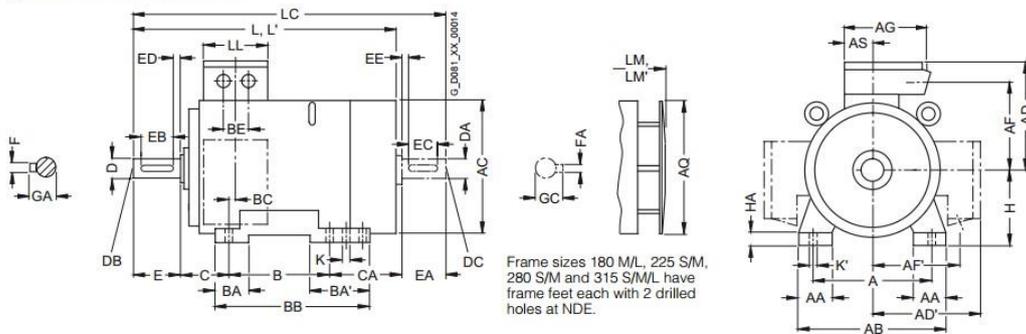
Rated output at 60 Hz	Frame size	Operating values at rated output			Nominal efficiency at 60 Hz	Power factor at 60 Hz 4/4-load	Rated current at 460 V, 60 Hz	Order No. For Order No. supplements for voltage and type of construction, see table below	Price	Weight IM B3 type of construction approx. m kg
P_{rated} HP	FS	n_{rated} rpm	T_{rated} Nm	EPACT with CC No. CC 032A						
6-pole, 1200 rpm at 60 Hz, temperature class 155 (F), IP55 degree of protection, for use in the North American market according to EPACT										
20	180 L	1178	121	Yes	91	0.8	25.5	1LG6 186-6AAQQ		175
25	200 L	1180	151	Yes	91.7	0.79	32.5	1LG6 206-6AAQQ		210
30	200 L	1180	181	Yes	91.7	0.8	38.5	1LG6 207-6AAQQ		240
40	225 M	1184	241	Yes	93	0.82	49	1LG6 223-6AAQQ		325
50	225 M	1184	301	Yes	93	0.83	61	1LG6 228-6AAQQ ¹⁾		355
50	250 M	1186	300	No	93	0.82	61	1LG6 253-6AAQQ		405
60	250 M	1186	361	Yes	93.6	0.82	73	1LG6 258-6AAQQ ¹⁾		435
60	280 S	1190	359	No	94.1	0.83	72	1LG6 280-6AAQQ		520
75	280 M	1190	449	No	94.5	0.83	89	1LG6 283-6AAQQ		570
100	280 M	1190	599	Yes	94.5	0.84	118	1LG6 288-6AAQQ ¹⁾		615
100	315 S	1191	598	Yes	94.5	0.82	120	1LG6 310-6AAQQ		760
125	315 M	1191	747	Yes	94.5	0.84	148	1LG6 313-6AAQQ		935
150	315 L	1192	896	Yes	95	0.84	176	1LG6 316-6AAQQ		1010
175	315 L	1192	1046	Yes	95	0.84	205	1LG6 317-6AAQQ		1180
200	315 L	1192	1195	Yes	95.4	0.84	235	1LG6 318-6AAQQ		1245

Order No. supplements

Dimensional drawings

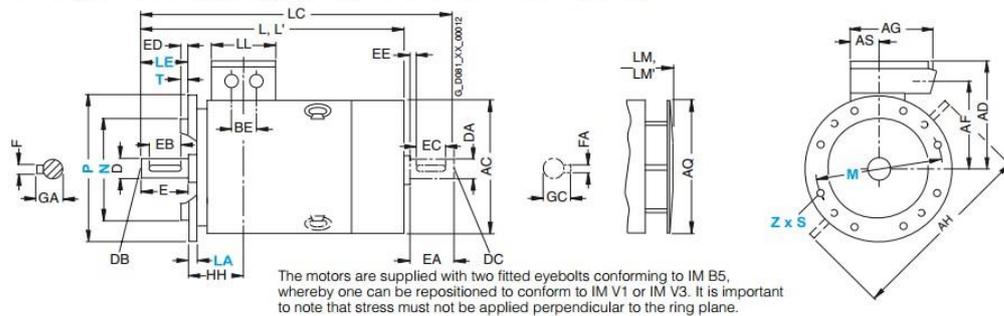
Cast-iron series 1LG4, frame sizes 180 M to 315 L

Type of construction IM B3



Types of construction IM B5 and IM V1

For flange dimensions, see Page 2/140 (Z = the number of retaining holes)



For motor			Dimension designation acc. to IEC																					
Frame size	Type	Number of poles	A	AA	AB	AC ¹⁾	AD	AD'	AF	AF'	AG	AH	AQ	AS	B*	BA	BA'	BB	BC	BE	C	CA*	H	HA
180 M	1LG4 183	2, 4	279	65	339	363	262	262	220	220	152	452	340	71	241	70	111	328	36	54	121	202	180	20
180 L	1LG4 186	4, 6, 8	279	65	339	363	262	262	220	220	152	452	340	71	279	70	111	328	36	54	121	164	180	20
	1LG4 188	2, 4, 6, 8	279	65	339	363	262	262	220	220	152	452	340	71	279	70	111	328	36	54	121	215	180	20
200 L	1LG4 206	2, 6	318	70	378	402	300	300	247	247	260	512	340	96	305	80	80	355	63	85	133	177	200	25
	1LG4 207	2, 4, 6, 8	318	70	378	402	300	300	247	247	260	512	340	96	305	80	80	355	63	85	133	177	200	25
	1LG4 208	2, 6, 4, 8	318	70	378	402	300	300	247	247	260	512	340	96	305	80	80	355	63	85	133	234	200	25
																						177		
225 S	1LG4 220	4, 8	356	80	436	442	325	325	272	272	260	556	425	96	286	85	110	361	47	85	149	218	225	34
225 M	1LG4 223	2	356	80	436	442	325	325	272	272	260	556	425	96	311	85	110	361	47	85	149	193	225	34
	1LG4 228	2, 4, 6, 8	356	80	436	442	325	325	272	272	260	556	425	96	311	85	110	361	47	85	149	253	225	34
250 M	1LG4 253	2	406	100	490	495	392	392	308	308	300	620	470	118	349	100	100	409	69	110	168	235	250	40
	1LG4 258	2, 4, 6, 8	406	100	490	495	392	392	308	308	300	620	470	118	349	100	100	409	69	110	168	235	250	40
																						305		
																						235		
280 S	1LG4 280	2	457	100	540	555	432	432	348	348	300	672	525	118	368	100	151	479	62	110	190	267	280	40
280 M	1LG4 283	2, 4, 6, 8	457	100	540	555	432	432	348	348	300	672	525	118	419	100	151	479	62	110	190	216	280	40
	1LG4 288	2, 4, 6, 8	457	100	540	555	432	432	348	348	300	672	525	118	419	100	151	479	62	110	190	326	280	40
																								216
315 S	1LG4 310	2	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	406	125	176	527	69	110	216	315	315	50
	1LG4 310	4, 6, 8	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	457	125	176	527	69	110	216	264	315	50
315 M ²⁾	1LG4 313	2	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	457	125	176	527	69	110	216	264	315	50
	1LG4 313	4, 6, 8	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	508	125	176	578	69	110	216	373	315	50
315 L ²⁾	1LG4 316/317	2	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	508	125	176	578	69	110	216	373	315	50
	1LG4 316/317	4, 6, 8	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	508	125	176	578	69	110	216	513	315	50
	1LG4 318	8	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	508	155	206	648	69	110	216	513	315	50
	1LG4 318	6	508	120	610	610	500	500	400	400	380	780	590	154	508	155	206	648	69	110	216	513	315	50

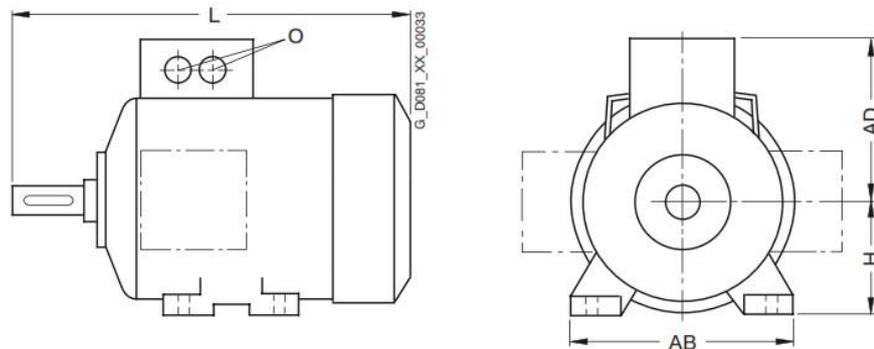
* This dimension is assigned in DIN EN 50347 to the frame size listed.

²⁾ With order codes for connection box positions (K09, K10, K11) only fitted feet with 3 drilled holes with dimension "B" (406, 457 and 508 mm). BB will then be 666 mm.

¹⁾ Measured across the bolt heads.

Overview

Overall dimensions



Frame size	Type	Number of poles	Dimensions				
			L	AD	H	AB	O
315 S/	1LG6 310	2	1072	500	315	610	2 x M63 x 1.5
315 M/	1LG6 310	4, 6, 8	1102	500	315	610	2 x M63 x 1.5
315 L	1LG6 313	2	1232	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 313	4, 6	1262	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 313	8	1102	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 316	2	1232	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 316	4, 6, 8	1262	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 317	8	1262	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 317	2	1372	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 317	4, 6	1402	500	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 318	2	1372	651	315	610	2 x M63 x 1.5
	1LG6 318	4	1402	651	315	610	2 x M63 x 1.5
1LG6 318	6, 8	1402	500	315	610	2 x M63 x 1.5	

A.6. Catálogo del reductor de velocidad

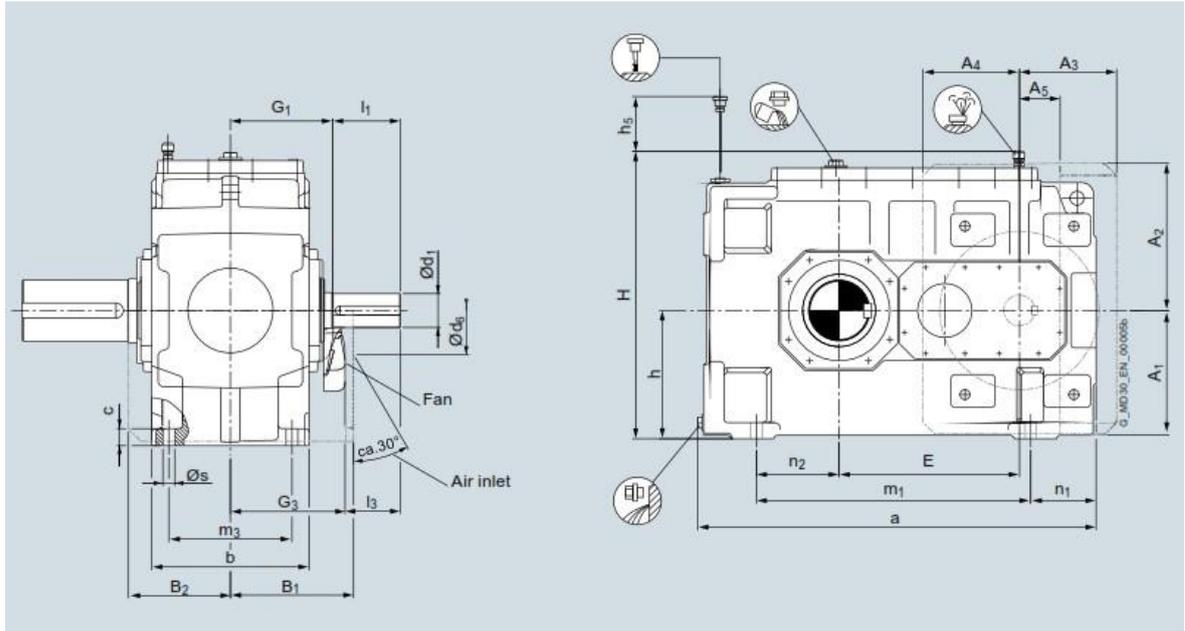
Driven machines	Effective operating period under load in hours		
	≤ 0.5	> 0.5 - 10	> 10
Rolls			
- Reversing blooming mills	-	2.5	2.5
- Reversing slabbing mills	-	2.5	2.5
- Reversing wire mills	-	1.8	1.8
- Reversing sheet mills	-	2.0	2.0
- Reversing plate mills	-	1.8	1.8
• Roll adjustment drives	0.9	1.0	-
Conveyors			
• Bucket conveyors	-	1.4	1.5
• Hauling winches	1.4	1.6	1.6
• Hoists	-	1.5	1.8
• Belt conveyors ≤ 150 kW	1.0	1.2	1.3
• Belt conveyors ≥ 150 kW	1.1	1.3	1.4
• Goods lifts ¹⁾	-	1.2	1.5
• Passenger lifts ¹⁾	-	1.5	1.8
• Apron conveyors	-	1.2	1.5
• Escalators	1.0	1.2	1.4
• Railway vehicles	-	1.5	-

Factor for prime mover f_2

	Factor for prime mover f_2
Electric motors, hydraulic motors, turbines	1.0
Piston engines 4 - 6 cylinders, cyclic variation 1 : 100 to 1 : 200	1.25
Piston engines 1 - 3 cylinders, cyclic variation 1 : 100	1.5

Peak torque factor f_3

	Peak torque factor f_3			
	Load peaks per hour			
	1 - 5	6 - 30	31 - 100	> 100
Steady direction of load	0.5	0.65	0.7	0.85
Alternating direction of load	0.7	0.95	1.10	1.25



Gear unit sizes	Dimensions in mm																				
	Drive Designs G, H, I on request for all ratios									Fan 1)											
	d ₁	l ₁	l ₃	Ød ₁	l ₁	l ₃	d ₁	l ₁	l ₃	G ₁	G ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	B ₁	B ₂	Ød ₀		
509	i _N = 6.3 - 10			11.2 - 14			16 - 18														
	80	m6	160	130	60	m6	140	110	50	m6	110	80	240	270	320	375	265	245	100	320	245
510	i _N = 8 - 12.5			14 - 18			20 - 22.4														
	80	m6	160	130	60	m6	140	110	50	m6	110	80	240	270	320	375	265	245	100	320	245
511	i _N = 6.3 - 10			11.2 - 14			16 - 18														
	100	m6	180	145	80	m6	165	130	70	m6	140	105	275	310	380	440	320	295	155	360	285
512	i _N = 8 - 12.5			14 - 18			20 - 22.4														
	100	m6	180	145	80	m6	165	130	70	m6	140	105	275	310	380	440	320	295	155	360	285

Gear unit sizes	Dimensions in mm											
	a	b	c	E	H	h ²⁾	h ₅	m ₁	m ₃	n ₁	n ₂	s
509	988	370	40	447	715	320	360	680	290	162	205	28

A.7. Propiedades del acero

Material	Modulus of Elasticity E		Modulus of Rigidity G		Poisson's Ratio ν	Unit Weight w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lbf/in ³	lbf/ft ³	kN/m ³
Aluminum (all alloys)	10.4	71.7	3.9	26.9	0.333	0.098	169	26.6
Beryllium copper	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Brass	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Carbon steel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Cast iron (gray)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Copper	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Douglas fir	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Glass	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Lead	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesium	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molybdenum	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Monel metal	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Nickel silver	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Nickel steel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Phosphor bronze	16.1	111.0	6.0	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Stainless steel (18-8)	27.6	190.0	10.6	73.1	0.305	0.280	484	76.0
Titanium alloys	16.5	114.0	6.2	42.4	0.340	0.160	276	43.4

A.8. Densidad de productos

PRODUCTO A MANIPULAR	DENSIDAD (TM/M ³)
Caña de azúcar cortada	0,24-0,28
Cáñamo semilla	0,50
Caolín	1,30
Caolín (seco)	0,80
Caolín polvo	1,01
Caolín pulverizado	0,35
Caolín triturado	1,02
Caolín troceado	2,60
Caolín verde triturado	1,02
Carbón (otras formas)	0,85
Carbón (polvo)	0,59
Carbón a granel	0,80-1
Carbón activado, nódulos	1
Carbón antracita	0,86
Carbón barro flotado	1
Carbón bituminoso muy humedo	0,88
Carbón bituminoso pulverizado	0,48
Carbón bituminoso, bruto, seco	0,67
Carbón bituminoso, humedo	0,80
Carbón coqueable	0,80
Carbón chestnut	0,73
Carbón de cieno	2,00

A.9. Factor de servicio

Maquinaria impulsada	Fuente de potencia	
	Características del par de torsión normal	Par de torsión alto o no uniforme
Uniforme	1.0 a 1.2	1.1 a 1.3
Impacto ligero	1.1 a 1.3	1.2 a 1.4
Impacto medio	1.2 a 1.4	1.4 a 1.6
Impacto pesado	1.3 a 1.5	1.5 a 1.8

A.10. Factor de corrección por número de dientes

Número de dientes en catarina impulsora	Potencia preextremo, K_1	Potencia posextremo, K_1
11	0.62	0.52
12	0.69	0.59
13	0.75	0.67
14	0.81	0.75
15	0.87	0.83
16	0.94	0.91
17	1.00	1.00
18	1.06	1.09
19	1.13	1.18
20	1.19	1.28
N	$(N_1/17)^{1.08}$	$(N_1/17)^{1.5}$

A.11. Factor de corrección por número de torones

Número de torones	K_2
1	1.0
2	1.7
3	2.5
4	3.3
5	3.9
6	4.6
8	6.0

A.12. Capacidad nominal de potencias tabuladas de cadenas

Velocidad de la catarina, rpm		Número ANSI de cadena							
		80	100	120	140	160	180	200	240
50	Tipo A	2.88	5.52	9.33	14.4	20.9	28.9	38.4	61.8
100		5.38	10.3	17.4	26.9	39.1	54.0	71.6	115
150		7.75	14.8	25.1	38.8	56.3	77.7	103	166
200		10.0	19.2	32.5	50.3	72.9	101	134	215
300		14.5	27.7	46.8	72.4	105	145	193	310
400	Tipo B	18.7	35.9	60.6	93.8	136	188	249	359
500		22.9	43.9	74.1	115	166	204	222	0
600		27.0	51.7	87.3	127	141	155	169	
700		31.0	59.4	89.0	101	112	123	0	
800		35.0	63.0	72.8	82.4	91.7	101		
900		39.9	52.8	61.0	69.1	76.8	84.4		
1 000		37.7	45.0	52.1	59.0	65.6	72.1		
1 200		28.7	34.3	39.6	44.9	49.9	0		
1 400		22.7	27.2	31.5	35.6	0			
1 600		18.6	22.3	25.8	0				
1 800	15.6	18.7	21.6						
2 000	13.3	15.9	0						
2 500	9.56	0.40							
3 000	7.25	0							
Tipo C		Tipo C'							

Nota: Tipo A, lubricación manual o por goteo; tipo B, lubricación por baño o disco; tipo C, lubricación por chorro de aceite; tipo C', es tipo C, pero ésta es una región de excoiación; envíe el diseño al fabricante para su evaluación.

A.13. Dimensiones de cadenas estándares de rodillos

Número de cadena ANSI	Paso, pulg (mm)	Ancho, pulg (mm)	Resistencia mínima a la tensión, lbf (N)	Peso promedio, lbf/pie (N/m)	Diámetro del rodillo, pulg (mm)	Espaciamiento de torones múltiples, pulg (mm)
25	0.250 (6.35)	0.125 (3.18)	780 (3 470)	0.09 (1.31)	0.130 (3.30)	0.252 (6.40)
35	0.375 (9.52)	0.188 (4.76)	1 760 (7 830)	0.21 (3.06)	0.200 (5.08)	0.399 (10.13)
41	0.500 (12.70)	0.25 (6.35)	1 500 (6 670)	0.25 (3.65)	0.306 (7.77)	— —
40	0.500 (12.70)	0.312 (7.94)	3 130 (13 920)	0.42 (6.13)	0.312 (7.92)	0.566 (14.38)
50	0.625 (15.88)	0.375 (9.52)	4 880 (21 700)	0.69 (10.1)	0.400 (10.16)	0.713 (18.11)
60	0.750 (19.05)	0.500 (12.7)	7 030 (31 300)	1.00 (14.6)	0.469 (11.91)	0.897 (22.78)
80	1.000 (25.40)	0.625 (15.88)	12 500 (55 600)	1.71 (25.0)	0.625 (15.87)	1.153 (29.29)
100	1.250 (31.75)	0.750 (19.05)	19 500 (86 700)	2.58 (37.7)	0.750 (19.05)	1.409 (35.76)
120	1.500 (38.10)	1.000 (25.40)	28 000 (124 500)	3.87 (56.5)	0.875 (22.22)	1.789 (45.44)
140	1.750 (44.45)	1.000 (25.40)	38 000 (169 000)	4.95 (72.2)	1.000 (25.40)	1.924 (48.87)
160	2.000 (50.80)	1.250 (31.75)	50 000 (222 000)	6.61 (96.5)	1.125 (28.57)	2.305 (58.55)
180	2.250 (57.15)	1.406 (35.71)	63 000 (280 000)	9.06 (132.2)	1.406 (35.71)	2.592 (65.84)
200	2.500 (63.50)	1.500 (38.10)	78 000 (347 000)	10.96 (159.9)	1.562 (39.67)	2.817 (71.55)
240	3.00 (76.70)	1.875 (47.63)	112 000 (498 000)	16.4 (239)	1.875 (47.62)	3.458 (87.83)

A.14. Factor de corrección por superficie

Acabado superficial	Factor <i>a</i>		Exponente <i>b</i>
	S_{utr} kpsi	S_{utr} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

A.15. Factor de corrección por tamaño

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual

$$k_b = 1$$

A.16. Factor de corrección por temperatura

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

A.17. Factor de corrección confiabilidad

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_α	Factor de confiabilidad k_α
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

A.18. Tabla de propiedades de tubo de acero ASTM A-53 grado B

:: Composición Química (Más. %):								
Grado B								
C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.3	1.2	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08

:: Propiedades Mecánicas:				
NORMA TECNICA	F	R	A	Norma Equivalente
	Kg/mm2	Kg/mm2	%	
ASTM A-53 GR-A	21 min	34 min	23 min	JIS G-3454
ASTM A-53 GR-B	25 min	42 min	18 min	JIS G-3454
ASTM A-106 GR-B	25 min	42 min	18 min	JIS G-3456
API 5L B	25 min	42 min	19 min	JIS G-3454

Diametro Nominal			Schedule	Espesor de pared		Peso Nominal	Presion de Prueba	
Interior	Exterior			pulg.	mm		Kg/m	lb/pulg ²
pulg.	pulg.	mm						
5"	5.563	141.3	40	0.258	6.55	21.77	1950	137.0
			80	0.375	9.53	30.94	2800	196.0
6"	6.625	168.3	40	0.280	7.11	28.26	1780	125.0
			80	0.432	10.97	42.56	2740	192.0
8"	8.625	219.1	40	0.322	8.18	42.55	1570	110.0
			80	0.500	12.70	64.64	2430	170.0
10"	10.750	273.0	40	0.365	9.27	60.29	1430	100.0
			80	0.594	15.09	95.97	2320	162.0
			STD.	0.365	9.27	60.31	1430	100.0
12"	12.750	323.8	40	0.406	10.31	79.70	1340	94.0
			80	0.688	17.48	132.04	2270	159.0
			STD.	0.375	9.53	73.88	1240	87.0

A.19. Valores sugeridos de la vida nominal de rodamientos SKF

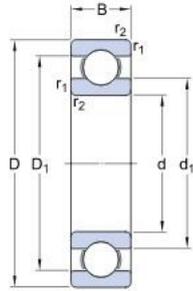
Guía de valores requeridos de vida nominal L10h para diferentes clases de máquinas

Clases de máquinas	L10h horas de servicio
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, aparatos para uso médico.	300 a 3 000
Máquinas usadas intermitente o por cortos períodos: Máquinas-herramienta portátiles, aparatos elevadores para talleres, máquinas para la construcción.	3 000 a 8 000
Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento por cortos períodos o intermitentemente: Ascensores, grúas para mercancías embaladas.	8 000 a 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario no totalmente utilizadas: Transmisiones por engranajes para uso general, motores eléctricos para uso industrial, machacadoras giratorias.	10 000 a 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario totalmente utilizadas : Máquinas-herramientas, máquinas para trabajar la madera, máquinas para la industria mecánica general, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipo de imprenta, separadores y centrifugas.	20 000 a 30 000
Máquinas para trabajo continuo, 24 horas al día: Cajas de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil.	40 000 a 50 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas cableadoras, maquinaria de propulsión para trasatlánticos.	60 000 a 100 000
Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, ventiladores y bombas para minas, rodamientos para la línea de eje de trasatlánticos.	> 100 000

A.20. Rodamiento SKF rígido de bolas

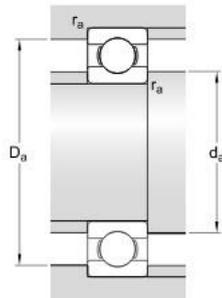
61940 MA

Dimensiones



d	200	mm
D	280	mm
B	38	mm
d ₁	≈ 225.7	mm
D ₁	≈ 255.2	mm
r _{1,2}	min. 2.1	mm

Dimensiones de los resaltes



d _a	min. 210	mm
D _a	max. 270	mm
r _a	max. 2	mm

Datos del cálculo

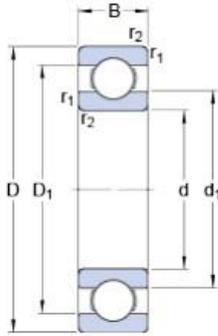
Capacidad de carga dinámica básica	C	148	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	166	kN
Carga límite de fatiga	P _u	4.5	kN
Velocidad de referencia		4800	r/min
Velocidad límite		3800	r/min
Factor de cálculo	k _r	0.02	
Factor de cálculo	f ₀	16.4	

Masa

Rodamiento de masa		7.324	kg
--------------------	--	-------	----

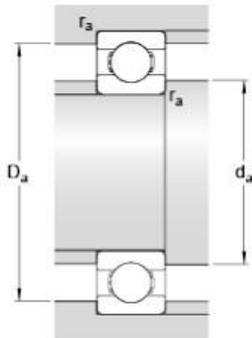
6040

Dimensiones



d	200	mm
D	310	mm
B	51	mm
d ₁	≈ 235.1	mm
D ₁	≈ 274.95	mm
r _{1,2}	min. 2.1	mm

Dimensiones de los resaltes



d _a	min. 210	mm
D _a	max. 300	mm
r _a	max. 2	mm

Datos del cálculo

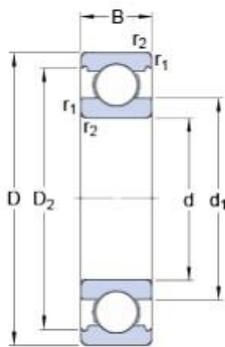
Capacidad de carga dinámica básica	C	216	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	245	kN
Carga límite de fatiga	P _u	6.4	kN
Velocidad de referencia		4300	r/min
Velocidad límite		2800	r/min
Factor de cálculo	k _r	0.025	
Factor de cálculo	f ₀	15.6	

Masa

Rodamiento de masa	12.25	kg
--------------------	-------	----

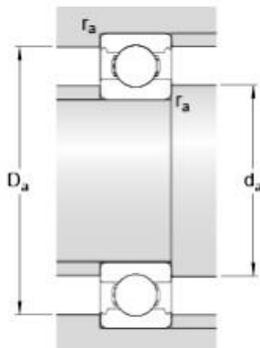
6320 M

Dimensiones



d	100	mm
D	215	mm
B	47	mm
d_1	≈ 135.85	mm
D_2	≈ 183.8	mm
$r_{1,2}$	min. 3	mm

Dimensiones de los resaltes



d_a	min. 114	mm
D_a	max. 201	mm
r_a	max. 2.5	mm

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	174	kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	140	kN
Carga límite de fatiga	P_u	4.7	kN
Velocidad de referencia		6700	r/min
Velocidad límite		6000	r/min
Factor de cálculo	k_r	0.03	
Factor de cálculo	f_0	13.2	

Masa

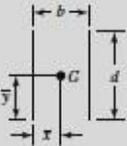
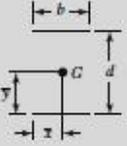
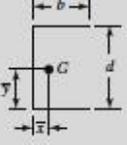
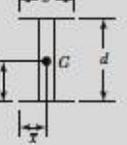
Rodamiento de masa	8.699	kg
--------------------	-------	----

A.21. Tamaños de soldadura

Tamaños mínimos de soldaduras de filete		
Espesor de la más gruesa de las partes unidas mm (pulg.)		Tamaño ¹ mínimo del filete mm (pulg.)
menor o igual que 6.3	($\leq 1/4$)	3.2 ($1/8$)
más de 6.3 hasta 12.7	($1/4$ a $1/2$)	4.8 ($3/16$)
más de 12.7 hasta 19.1	($1/2$ a $3/4$)	6.3 ($1/4$)
mayor que 19.1	($> 3/4$)	7.9 ($5/16$)

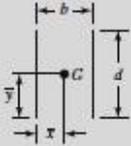
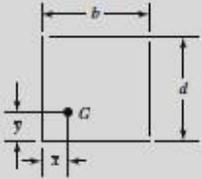
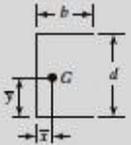
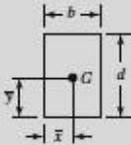
¹ Dimensión de la pierna del filete de soldadura. Deben usarse soldaduras depositadas en un solo paso.

A.22. Propiedades flexionante de la soldadura

Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete*			
Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de G	Segundo momento unitario del área
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$
	$A = 1.414\pi hr$		$I_u = \pi r^3$

A.23. Propiedades torsionante de la soldadura

Propiedades torsionales de las soldaduras de filete*

Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de G	Segundo momento polar unitario del área
	$A = 0.707 hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = d^3/12$
	$A = 1.41 hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b+d)}$	$J_u = \frac{(b+d)^4 - 6b^2d^2}{12(b+d)}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b+d}$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b+d}$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{(b+d)^3}{6}$
	$A = 1.414 \pi r$		$J_u = 2\pi r^3$

A.24. Catálogo del electrodo E7018



Indura 7018 - AR

Clasificación AWS: E-7018

- Electrodo para acero al carbono
- Con hierro en polvo
- Toda posición
- Corriente continua. Electrodo positivo
- Revestimiento: Gris

- Aprobado anualmente por el Lloyd's Register of Shipping, American Bureau of Shipping, Bureau Veritas, Germanischer Lloyd y Det Norske Veritas.

Descripción

El electrodo 7018-AR es de bajo contenido de hidrógeno y resistente a la humedad. Está especialmente diseñado para soldaduras que requieren severos controles radiográficos en toda posición. Su arco es suave y la pérdida por salpicadura es baja.

Usos

El 7018-RH es recomendado para trabajos donde se requiere alta calidad radiográfica, particularmente en calderas y cañerías. Por sus buenas propiedades físicas es ideal para ser usado en astilleros.

Aplicaciones típicas

- Aceros Cor-Ten, Mayari-R
- Luken 45 y 50
- Yलय y otros aceros estructurales de baja aleación.

Procedimiento para soldar

Para soldaduras de filetes horizontales y trabajo de soldadura en sentido vertical descendente, se debe usar un arco corto. No se recomienda la técnica de arrastre.

En la soldadura en posición de sobrecabeza debe usarse un arco corto con ligero movimiento oscilatorio en dirección de avance. Debe evitarse la oscilación brusca del electrodo.

Composición química (típica del metal depositado):

C 0,06%; Mn 1,00%; P 0,012%; S 0,015%; Si 0,48%

Características típicas del metal depositado:

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte (según norma AWS: A5.1-91):

Resistencia a la tracción : 73.000 lb/pulg² (453 MPa)
Límite de fluencia : 63.300 lb/pulg² (384 MPa)
Alargamiento en 50 mm. : 30%

Requerimientos según norma AWS: A5.1-91:

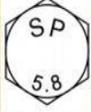
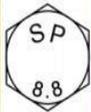
70.000 lb/pulg² (414 MPa)
58.000 lb/pulg² (331 MPa)
22%

Amperajes recomendados:

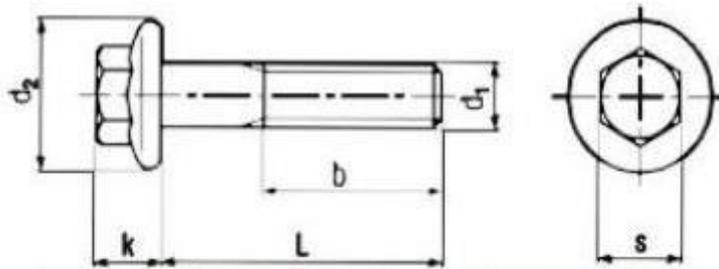
Diámetro pulg.	Electrodo mm.	Longitud pulg.	Electrodo mm.	Amperaje		Electrodos x kg. aprox.
				min.	max.	
3/32	2,4	12	300	70	120	65
1/8	3,2	14	350	120	150	32
5/32	4,0	14	350	140	200	19
3/16	4,8	14	350	200	275	14

A.25. Catálogo de pernos:

MARCAS DE CLASES RESISTENCIA PERNOS DE ACERO (EN)

CLASES DE RESISTENCIA Y MARCAS SODIPER	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	DIÁMETRO NOMINAL DEL PERNO	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	DUREZAS	
				PSI	KG/mm ²	MIN	MÁX		
 CLASE DE RESISTENCIA 5.8	ISO 898 PARTE 1	ACERO DE BAJO O MEDIANO CARBONO	DESDE M6 HASTA M38	54.000	71.000	38	50	B82	B99.5
 CLASE DE RESISTENCIA 8.8	ISO 898 PARTE 1	ACERO DE MEDIO CARBONO TEMPLADO Y REVENIDO	M6 HASTA M16	71.000	114.000	58	80	C22	C32
			SOBRE M16 HASTA M38	85.000	114.000	60	80	C23	C39
 CLASE DE RESISTENCIA 10.9	ISO 898 PARTE 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	DESDE M6 HASTA M38	118.000	143.000	83	100	C32	C39
 CLASE DE RESISTENCIA 12.9	ISO 898 PARTE 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	DESDE M6 HASTA M38	138.000	171.000	97	120	C39	C44

PSI : LIBRAS/PULGADAS CUADRADA
KG/mm² : KILOS POR MILIMETRO CUADRADO



Diameter	M6	M8	M10	M12	M16
b	18	22	26	30	38
d ₂ max.	14	18	22.3	26.6	35
k max.	6.6	8.1	9.2	11.5	14
s max.	10	13	15	16	21

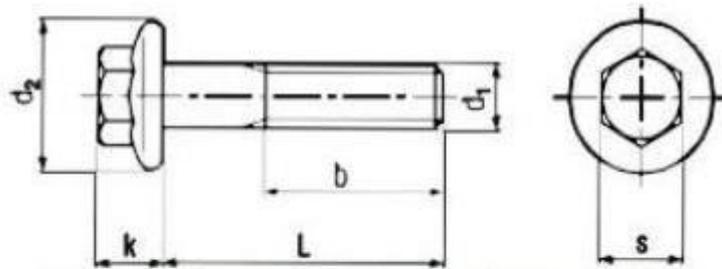
Propiedades mecánicas de elementos roscados de clase métrica

Clase	Rango del diámetro	Carga de prueba [MPa]	Esfuerzo de ruptura [MPa]	Material	Marcado de la cabeza
4.6	M5 - M36	225	400	Acero de bajo carbono ó acero al carbono	
4.8	M1.6 - M16	310	420	Acero de bajo carbono ó acero al carbono	
5.8	M5 - M24	380	520	Acero de bajo carbono ó acero al carbono	
8.8	M16 - M36	600	830	Acero al carbono, Templado y Revenido	
9.8	M1.6 - M16	650	900	Acero al carbono, Templado y Revenido	
10.9	M5 - M36	830	1040	Acero de bajo carbono martensítico, Templado y Revenido	
12.9	M1.6 - M36	970	1220	Acero aleado, Templado y Revenido	

A.26. Catálogo de pernos:

MARCAS DE CLASES RESISTENCIA PERNOS DE ACERO (EN)									
CLASES DE RESISTENCIA Y MARCAS SODIPER	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	DIÁMETRO NOMINAL DEL PERNO	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	DUREZAS	
				PSI	KG/mm ²	MIN	MÁX		
 CLASE DE RESISTENCIA 5.8	ISO 898 PARTE 1	ACERO DE BAJO O MEDIANO CARBONO	DESDE M6 HASTA M38	54.000	71.000	38	50	B82	B99.5
 CLASE DE RESISTENCIA 8.8	ISO 898 PARTE 1	ACERO DE MEDIO CARBONO TEMPLADO Y REVENIDO	M6 HASTA M16	71.000	114.000	58	80	C22	C32
			SOBRE M16 HASTA M38	85.000	114.000	60	80	C23	C39
 CLASE DE RESISTENCIA 10.9	ISO 898 PARTE 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	DESDE M6 HASTA M38	118.000	143.000	83	100	C32	C39
 CLASE DE RESISTENCIA 12.9	ISO 898 PARTE 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	DESDE M6 HASTA M38	138.000	171.000	97	120	C39	C44

PSI : LIBRAS/PULGADAS CUADRADA
KG/mm² : KILOS POR MILIMETRO CUADRADO



Diameter	M6	M8	M10	M12	M16
b	18	22	26	30	38
d_2 max.	14	18	22.3	26.6	35
k max.	6.6	8.1	9.2	11.5	14
s max.	10	13	15	16	21

A.27. Catálogo de piñones y cadenas

Cadena	T 450		35-3		D 455 T 455		332, 385 40 40-2 40-3					
Paso p	5		6		8		9,525		9,525		12,7	
rodillo d ₁	3,2		4,0		5,0		5,08		6,0-6,35		7,75-7,92	
N.º dientes z	Ø pri- mitivo d _o	Ø ex- terior d _k										
11	17,75	19,6	21,30	23,6	28,40	31,2	33,81	36,5	33,81	37,5	45,08	49,6
12	19,32	21,2	23,18	25,6	30,91	33,8	36,80	39,6	36,80	40,6	49,07	53,8
13	20,89	22,8	25,07	27,5	33,43	36,4	39,80	42,7	39,80	43,7	53,07	57,9
14	22,47	24,5	26,96	29,5	35,95	39,0	42,81	45,8	42,81	46,8	57,07	62,0
15	24,05	26,1	28,86	31,4	38,48	41,6	45,81	48,9	45,81	49,9	61,08	66,1
16	25,63	27,7	30,75	33,3	41,01	44,2	48,82	52,0	48,82	53,0	65,10	70,2
17	27,21	29,3	32,65	35,2	43,54	46,8	51,84	55,0	51,84	56,0	69,12	74,3
18	28,79	30,9	34,55	37,2	46,07	49,5	54,85	58,1	54,85	59,1	73,14	78,4
19	30,38	32,5	36,45	39,1	48,60	51,9	57,87	61,2	57,87	62,2	77,16	82,5
20	31,96	34,2	38,36	41,1	51,14	54,5	60,89	64,2	60,89	65,2	81,18	86,6
21	33,55	35,7	40,26	43,0	53,68	57,1	63,91	67,3	63,91	68,3	85,21	90,6
22	35,13	37,3	42,16	44,9	56,21	59,6	66,93	70,3	66,93	71,3	89,24	94,7
23	36,72	38,9	44,06	46,8	58,75	62,2	69,95	73,4	69,95	74,4	93,27	98,8
24	38,31	40,5	45,97	48,8	61,29	64,8	72,97	76,4	72,97	77,4	97,30	102,9
25	39,89	42,2	47,87	50,7	63,83	67,3	76,00	79,5	76,00	80,5	101,33	106,9
26	41,48	43,7	49,78	52,6	66,37	69,9	79,02	82,5	79,02	83,5	105,36	111,0
27	43,07	45,3	51,68	54,5	68,91	72,4	82,05	85,6	82,05	86,6	109,40	115,0
28	44,66	46,9	53,59	56,4	71,45	75,0	85,07	88,6	85,07	89,6	113,43	119,1
29	46,25	48,5	55,49	58,4	73,99	77,5	88,10	91,7	88,10	92,7	117,46	123,2
30	47,83	50,1	57,40	60,3	76,53	80,1	91,12	94,7	91,12	95,7	121,50	127,2
31	49,42	51,7	59,31	62,2	79,08	82,7	94,15	97,8	94,15	98,8	125,53	131,3
32	51,01	53,3	61,21	64,1	81,62	85,7	97,18	100,8	97,18	101,8	129,57	135,3
33	52,60	54,9	63,12	66,0	84,16	87,8	100,20	103,8	100,20	104,8	133,61	139,4
34	54,19	56,5	65,03	67,9	86,70	90,3	103,23	106,9	103,23	107,9	137,64	143,4
35	55,78	58,2	66,93	69,8	89,25	92,9	106,26	109,9	106,26	110,9	141,68	147,5
36	57,37	59,7	68,84	71,8	91,79	95,4	109,29	113,0	109,29	114,0	145,72	151,5
37	58,96	61,3	70,75	73,7	94,33	98,0	112,31	116,0	112,31	117,0	149,75	155,6
38	60,55	62,9	72,66	75,6	96,88	100,5	115,34	119,0	115,34	120,0	153,79	159,6
39	62,14	64,5	74,57	77,5	99,42	103,1	118,37	122,1	118,37	123,1	157,83	163,7
40	63,73	66,1	76,47	79,4	101,96	105,6	121,40	125,1	121,40	126,1	161,87	167,7
41	65,32	67,7	78,38	81,3	104,51	108,2	124,43	128,1	124,43	129,1	165,91	171,8
42	66,91	69,3	80,29	83,2	107,05	110,7	127,46	131,2	127,46	132,2	169,95	175,9
43	68,50	70,9	82,20	85,2	109,60	113,3	130,49	134,2	130,49	135,2	173,98	179,9
44	70,09	72,5	84,11	87,1	112,14	115,8	133,52	137,2	133,52	138,2	178,02	184,0
45	71,68	74,1	86,01	89,0	114,68	118,4	136,55	140,3	136,55	141,3	182,06	188,0
46	73,27	75,7	87,92	90,9	117,23	120,9	139,58	143,3	139,58	144,3	186,10	192,0
47	74,86	77,3	89,83	92,8	119,77	123,5	142,61	146,4	142,61	147,4	190,14	196,1
48	76,45	78,8	91,74	94,7	122,32	126,0	145,64	149,4	145,64	150,4	194,18	200,1
49	78,04	80,4	93,65	96,6	124,86	128,6	148,67	152,4	148,67	153,4	198,22	204,2
50	79,63	82,0	95,56	98,5	127,41	131,1	151,70	155,5	151,70	156,5	202,26	208,2
51	81,22	83,6	97,46	100,5	129,95	133,7	154,73	158,5	154,73	159,5	206,30	212,3
52	82,81	85,2	99,37	102,4	132,50	136,2	157,75	161,5	157,75	162,5	210,34	216,3
53	84,40	86,8	101,28	104,3	135,04	138,8	160,78	164,5	160,78	165,6	214,38	220,4
54	85,99	88,4	103,19	106,2	137,59	141,3	163,81	167,6	163,81	168,6	218,42	224,4
55	87,58	90,0	105,10	108,1	140,13	143,9	166,85	170,6	166,85	171,6	222,46	228,5
56	89,17	91,6	107,01	110,0	142,68	146,4	169,88	173,7	169,88	174,7	226,50	232,5
57	90,76	93,2	108,92	111,9	145,22	149,0	172,91	176,7	172,91	177,7	230,54	236,6
58	92,35	94,8	110,83	113,8	147,77	151,5	175,94	179,8	175,94	180,8	234,58	240,6
59	93,95	96,4	112,74	115,8	150,31	154,1	178,97	182,8	178,97	183,8	238,62	244,7
60	95,54	98,0	114,64	117,7	152,86	156,7	182,00	185,8	182,00	186,8	242,66	248,7
61	97,13	99,6	116,55	119,6	155,40	159,2	185,03	188,9	185,03	189,9	246,70	252,8
62	98,72	101,2	118,46	121,5	157,95	161,7	188,06	191,9	188,06	192,9	250,74	256,8
63	100,31	102,7	120,37	123,4	160,50	164,3	191,09	194,9	191,09	195,9	254,79	260,9
64	101,90	104,3	122,28	125,3	163,04	166,8	194,12	198,0	194,12	199,0	258,83	264,9
65	103,49	105,9	124,19	127,2	165,59	169,4	197,15	201,0	197,15	202,0	262,87	268,9

Diámetros primitivos y diámetro exterior d_k

(Ruedas para cadenas de rodillos DIN 8187, DIN 8188 y Norma de Fábrica)



Cadena	460		50 H 500		60 H 515		80 H 548		100 HX 563		120 HX	
	461	462	50 HX 501	D 501	60 HX 517	60 513	80 HX D 548	80 T 548	100 D 563	T 563	120	120-2
	D 462	50-2	T 501	60-2	D 513	80-2	100-2	100-3	120-2	120-3		
	T 462	50-3	60-3	T 513	80-3							
Paso p	12,7											
Rodillo d_1	8,51		10,16		11,91-12,07		15,88		19,05		22,23	
Nº dientes z	\varnothing primitivo d_0	\varnothing exterior d_k										
11	45.08	50.0	56.35	62.2	67.62	74.5	90.16	99.2	112.69	123.4	135.23	147.6
12	49.07	54.2	61.34	67.4	73.60	80.7	98.14	107.5	122.67	133.7	147.21	160.0
13	53.07	58.3	66.34	72.5	79.60	86.9	106.14	115.7	132.67	144.0	159.21	172.4
14	57.07	62.4	71.34	77.7	85.61	93.1	114.15	124.0	142.68	154.3	171.22	184.7
15	61.08	66.5	76.35	82.8	91.62	99.2	122.17	132.2	152.71	164.6	183.25	197.0
16	65.10	70.6	81.37	87.9	97.65	105.4	130.20	140.4	162.74	174.9	195.29	209.3
17	69.12	74.7	86.39	93.0	103.67	111.5	138.23	148.5	172.79	185.1	207.35	221.6
18	73.14	78.8	91.42	98.1	109.71	117.7	146.27	156.7	182.84	195.3	219.41	233.9
19	77.16	82.9	96.45	103.2	115.74	123.8	154.32	164.9	192.90	205.5	231.48	246.1
20	81.18	87.0	101.48	108.3	121.78	129.9	162.37	173.0	202.93	215.7	243.55	253.4
21	85.21	91.0	106.51	113.4	127.82	136.0	170.42	181.2	213.03	225.9	255.63	270.6
22	89.24	95.1	111.55	118.5	133.86	142.1	178.48	189.3	223.10	236.1	267.72	282.8
23	93.27	99.2	116.59	123.6	139.90	148.2	186.54	197.5	233.17	246.2	279.81	295.0
24	97.30	103.3	121.62	128.7	145.95	154.3	194.60	205.6	243.25	256.4	291.90	307.2
25	101.33	107.3	126.66	133.8	151.99	160.4	202.66	213.7	253.32	266.6	303.99	319.4
26	105.36	111.4	131.70	138.8	158.04	166.5	210.72	221.9	263.40	276.7	316.09	331.6
27	109.40	115.4	136.74	143.9	164.09	172.6	218.79	230.0	273.49	286.9	328.19	343.8
28	113.43	119.5	141.79	149.0	170.14	178.7	226.86	238.1	283.57	297.0	340.29	355.9
29	117.46	123.6	146.83	154.1	176.20	184.8	234.93	246.2	293.66	307.2	352.39	368.1
30	121.50	127.6	151.87	159.1	182.25	190.9	243.00	254.3	303.75	317.3	364.50	380.3
31	125.53	131.7	156.92	164.2	188.30	197.0	251.07	262.5	313.83	327.5	376.60	392.5
32	129.57	135.7	161.93	169.3	194.35	203.0	259.14	270.6	323.92	337.6	388.71	404.6
33	133.61	139.8	167.01	174.4	200.41	209.1	267.21	278.7	334.01	347.7	400.82	416.8
34	137.64	143.8	172.05	179.4	206.46	215.2	275.29	286.8	344.11	357.9	412.93	428.9
35	141.68	147.9	177.10	184.5	212.52	221.3	283.36	294.9	354.20	368.0	425.04	441.1
36	145.72	152.0	182.14	189.6	218.57	227.4	291.43	303.0	364.29	378.1	437.15	453.3
37	149.75	156.0	187.19	194.6	224.63	233.5	299.51	311.1	374.38	388.3	449.26	465.4
38	153.79	160.1	192.24	199.7	230.69	239.5	307.58	319.2	384.48	398.4	461.38	477.6
39	157.83	164.1	197.29	204.8	236.74	245.6	315.66	327.3	394.57	408.5	473.49	489.8
40	161.87	168.2	202.35	209.8	242.80	251.7	323.74	335.4	404.67	418.7	485.60	501.9
41	165.91	172.2	207.38	214.9	248.86	257.8	331.81	343.5	414.77	428.8	497.72	514.1
42	169.95	176.3	212.43	219.9	254.92	263.8	339.89	351.6	424.86	438.9	509.84	526.2
43	173.98	180.3	217.48	225.0	260.98	269.9	347.97	359.7	434.96	449.0	521.95	538.4
44	178.02	184.4	222.53	230.1	267.04	276.0	356.05	367.8	445.06	459.2	534.07	551.5
45	182.06	188.4	227.58	235.1	273.09	282.0	364.12	375.9	455.16	469.3	546.19	562.6
46	186.10	192.5	232.63	240.2	279.15	288.1	372.20	384.0	465.25	479.4	558.31	574.8
47	190.14	196.5	237.68	245.3	285.21	294.2	380.28	392.1	475.35	489.5	570.42	586.9
48	194.18	200.6	242.73	250.3	291.27	300.3	388.36	400.2	485.45	499.6	582.54	599.1
49	198.22	204.6	247.78	255.4	297.33	306.4	396.44	408.3	495.55	509.8	594.66	611.2
50	202.26	208.6	252.83	260.4	303.39	312.4	404.52	416.4	505.65	519.9	606.78	623.4
51	206.30	212.7	257.88	265.5	309.45	318.5	412.60	424.5	515.75	530.0	618.90	635.5

