

## Diseño de un molino de bolas con capacidad de 12 tm/h de molienda de carbon antracita, para mejorar la operación de la caldera TSX-G de lecho fluidizado de la empresa TRUPAL S.A

Design of a ball mill with a capacity of 12 tm/h of coal milling anthracite, to improve the operation of the TSX-G fluidized bed boiler of the company TRUPAL S. A

Junior Alberto Jiménez Bazán <sup>1</sup>

### 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\$ US\$, con un TIR de 976.11%. 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. | **Palabras claves:** Impresión 3D, Cabezales intercambiables, Diseño paramétrico.

### 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, i.e. 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%. Compare the results obtained in this thesis with the other authors. It was finally concluded that the ball mill presents an economic improvement. | **Keywords:** 3D printing, Interchangeable heads, Parametric design.

<sup>1</sup> Universidad César Vallejo - Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
E-mail: junior.jiba@hotmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN:

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 fluidizado 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 de 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 – 300µm (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).

## 2. CONTENIDO:

La investigación se basa en la termodinámica, mecánica de materiales, diseño, simulación de sistema electromecánico y análisis económicos.

### Balance de Energía.

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

$$\eta_{\text{cald}} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_{\text{agua}})}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100\% \quad \dots \text{EC (1.1)}$$

$$h_{\text{GC}} = \frac{\dot{m}_{\text{cble1}} * \text{PCI}_{\text{cble1}} + \dot{m}_{\text{cble2}} * \text{PCI}_{\text{cble2}}}{(1 + \text{Ratio}) * (\dot{m}_{\text{cble1}} + \dot{m}_{\text{cble2}})} \quad \dots \text{EC. (1.2)}$$

### Consumo Especifico de Energía y Geometría de Molino

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

### Diseño del Molino.

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

### Cálculo de la velocidad adecuada del Molino.

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

### Cálculo de la velocidad crítica del molino.

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

**Volumen total útil del molino de Bolas**

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

**Cálculo del % de volumen ocupado por las bolas del Molino.**

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

**Volumen Ocupado por las bolas en el molino.**

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

**Peso de las bolas.**

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

**Cálculo del % de velocidad critica a la que debe operar el molino.**

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

**Tamaño máximo de las bolas de acero.**

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

**Análisis de transmisión por cadenas.**

**Relación de transmisión de engranajes**

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

**Longitud de paso.**

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

**Distancia entre centros.**

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

$$A = \frac{N_1 + N_2}{2} - \frac{L}{p} \quad \dots \text{Ec (1.16)}$$

**Potencia permitida por la cadena.**

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

**Potencia de diseño.**

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

**Momento de Torsor o torque**

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

**Criterio de distancia entre centros entre catari-nas.**

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

**Angulo de contacto.**

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

**Diseño del eje.**

$$\sqrt{4 \left( \frac{16M}{\pi d^3} + \frac{2P}{\pi d^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{16T}{\pi d^3} \right)^2} \geq \frac{S_y}{n_s} \quad \dots \text{Ec (1.21)}$$

**Esfuerzo flexionante**

$$\sigma_f = \frac{M_{R * C}}{I} \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{d_{ext}}{2} \\ I = \frac{\pi * (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64} \end{array} \right\}$$

**Esfuerzo torsor**

$$\tau_T = \frac{T * C}{J} \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{d_{ext}}{2} \\ J = \frac{\pi * (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{32} \end{array} \right\}$$

**Diseño de Fatiga.**

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

**Esfuerzos medios y alternos de fatiga.**

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

**Criterio de falla.**

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

**Rodamientos**

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

**Fuerza Radial.**

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

**Carga dinámica.**

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

**Diseño del Cilindro**

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

**Peso que soporta la estructura del cilindro del molino de bolas.**

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

**Rendimiento Energético en mejora del caldero acuotubular.**

$$\dot{m}_{carbón\ antracita} = \frac{\frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{aa})}{\eta_{caldera\ esperado}} - \dot{m}_{médula\ bagazo} * PCI_{médula\ bagazo}}{PCI_{carbón\ antracita}}$$

**Retorno de Inversión.**

$$ROI = \frac{I_{nversion}}{Beneficios\ util} \dots Ec. (1.26)$$

**3. DISCUSIÓN:**

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.

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.

El modelo del molino de bolas en SolidWorks fue fundamental para el estudio de resistencia de los componentes de la transmisión mecánica (ejes,

Concluyendo, que las herramientas computacionales CAD, fueron de gran importancia al momento de evaluar cada

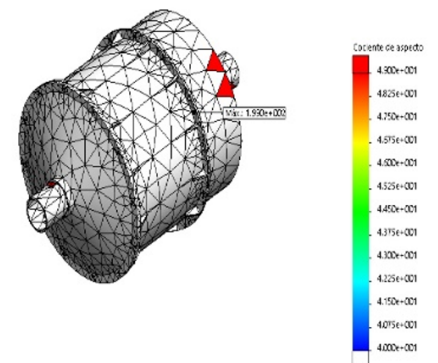
una de las soluciones que se plantearon dentro del desarrollo de este trabajo. El apoyo en la teoría de elementos finitos (Algor, Ansys), las modelaciones 3D (Solid-Edge, Solid Works, Visual Nastran), modelaciones 2D (Working Model) resultaron importantes al momento de tomar decisiones en la selección 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.

**Modelo solidworks molino de bolas simulación.**

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.

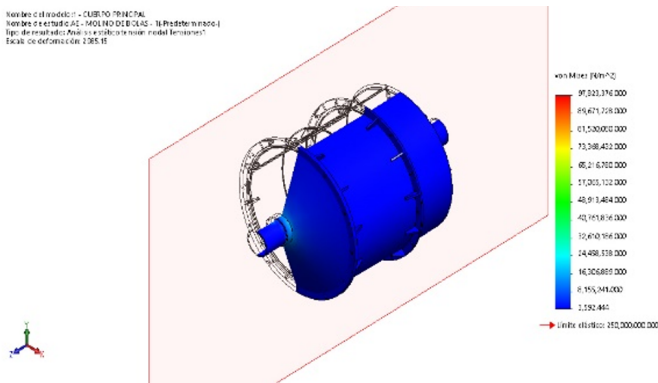
**Mallado del cuerpo cilindro de bolas solidworks**

Nombre del modelo 1 - CUERPO PRINCIPAL  
 Nombre de estudio AS - MOLINO DE BOLAS - 16 (Predefinido)  
 Tipo de resultado: Coeficiente de aspecto (Tratado de calidad de malla)  
 Valor global: 1.920E+003

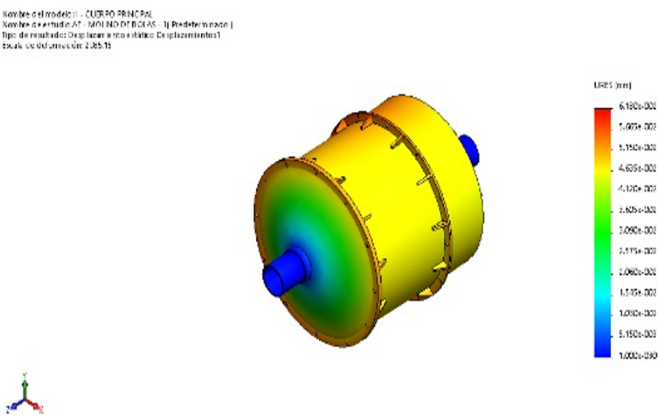


El esfuerzo de Von mises mayor, se encuentra en la misma zona que en nuestra evaluación en secciones anteriores, siendo este el punto “B”. El valor del esfuerzo máximo es menor en el modelo, debido a que en Solidworks se le agregó una placa de refuerzo y cartelas para rigidizar la tapa del lado B. La 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.

### Esfuerzo de Von mises en el molino de bolas



### Desplazamientos del molino de bolas



### Rendimiento energético en mejora de la caldera acuatubular.

$$\dot{m}_{\text{carbón antracita}} = \frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{aa})}{\eta_{\text{caldera esperado}}} - \frac{\dot{m}_{\text{médula bagazo}} * PCI_{\text{médula bagazo}}}{PCI_{\text{carbón antracita}}}$$

### 4. CONCLUSIÓN:

Se evaluó las condiciones actuales del caldero acuatubular 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%.

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.

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 contará con 18

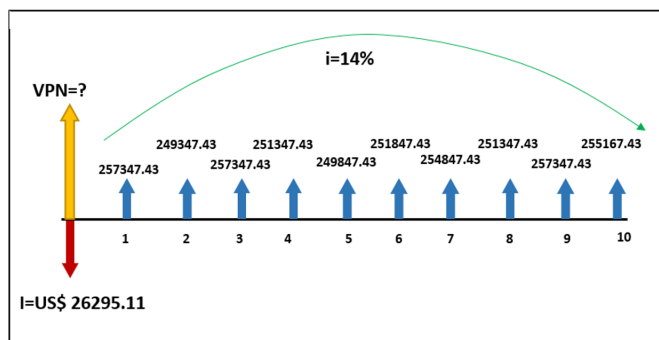
placas ASTM A36 de 4.76 mm de espesor, con 144 pernos de 3/16 pulgadas. La catarina comunicará el movimiento al cuerpo cilíndrico mediante 12 pernos M14 y soldadura de tope para las uniones con electrodos E6018 de 1/4 pulgadas de garganta, obteniendo un factor de seguridad máximo de 2.06.

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 en ambas el factor de seguridad es aceptable.

Se recalculó el rendimiento energético del caldero acuotubular TSX-G, encontrando un rendimiento energético de 58.72%, manifestando en un uso más eficiente del carbón antracita.

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.

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 US\$. 1,296,259.14.



## 5. RECOMENDACIONES:

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.

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

Se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo para mejor 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.

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

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.

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

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

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [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/disen-de-un-molino-de-bolas.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](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 2-5 North Carolina State University. ISBN: 7516(99)00029.
- [5] Kenneth Wark y Donal Richards. 2001. Termodinámica . Madrid : Concepción , 2001. 8448 12829.
- [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](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/molino-de-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](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/engineering-tools/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