

Diseño y Análisis Estructural de una Trituradora de vidrio para Reciclar Botellas.

Luis Abarca Carriel ⁽¹⁾, Ing. Ernesto Martínez ⁽²⁾

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador
laabarca@espol.edu.ec ⁽¹⁾ emartine@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

En la ciudad de Guayaquil se ha comenzado con la cultura del reciclaje. En algunos sitios de la urbe se encuentran puntos en donde se pueden depositar envases de distintos materiales para que sean reciclados. En ese punto empieza la cadena del reciclaje, y finaliza con la entrega del producto terminado. Muchos materiales se reciclan pero uno de ellos es el más noble y ese es el vidrio ya que es un material reciclable ciento por ciento, con una ventaja adicional que su costo de producción es muy bajo en comparación con otros materiales como el plástico o el tetra-pack. Por esta razón y con perspectivas de crecer en el negocio del reciclaje, se ha decidido diseñar una máquina trituradora de botellas para que sean recicladas, analizada por medio del programa SAP 2000. Para esto se acudió a la empresa líder en el país en fabricación de envases de vidrio para tomar muestras y realizar pruebas que servirán al diseño del triturador. Luego se analizará entre los diversos tipos de máquinas trituradoras para elegir la más apropiada. Finalmente se analiza el costo para determinar el valor del molino, llegando de esta forma a las conclusiones y recomendaciones.

Palabra claves: Reciclaje, vidrio, diseño, triturador.

Abstract

In Guayaquil the recycle culture has begun. In some places of the city you can find big containers where you can leave the bottles of any materials for recycling. Just there the recycling process begins, and finish in the carriage and delivery of the product. Many materials are recyclable but only one of them is the most generous, and it is glass, because it is one hundred percent recyclable, and it has an additional advantage, it's cost is less than other materials like plastic and tetra-pack. For those reasons and the vision of develop in recycling business, just decide to design a crush machine for glass bottles for the recycling process, and analyzed by SAP 2000. For this, I went to a leader enterprise in manufacturing of glass bottles in the country to take samples and realize tests that will serve to design the crushing machine. Then it will be analyzed between many kinds of crush machines to choose the most appropriate. Finally a cost analysis is realised to get the real cost of the machine, arriving in this way at the conclusions and recommendations.

Key words: Recycle, glass, design, crushing machine.

1. Introducción

En la actualidad en nuestro planeta se ha presentado varios problemas y uno de ellos es la contaminación, y a largo plazo se estima que será la escasez de ciertos elementos como el agua dulce, petróleo y carbón para enumerar los más importantes, pero también de otros productos. Debido a esto la industria del reciclaje ha crecido a pasos agigantados. Este proceso consiste en la refabricación de productos a base de sus compuestos originales, dos ejemplos comunes son el vidrio y el papel.

El vidrio fue desplazado por el plástico y esto no sólo sucedió en el Ecuador, en muchos países se ha utilizado otro tipo de material para envasar productos desde bebidas hasta elementos químicos como fármacos y fertilizantes.

La industria del reciclaje es muy extensa, y comprende desde la recolección de la materia prima hasta la entrega del producto total, listo para ser comercializado, independientemente del material a reciclar.

Para este tema de tesis se ha escogido dentro de la gama amplia del proceso de producción, la parte que comprende la trituración de la botella. Previamente a este análisis, hay que conocer ciertos parámetros que no son muy comunes, como la composición química del vidrio, sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y eléctricas.

Posteriormente se estudia el reciclaje con sus diversos tipos y beneficios, así como el proceso de fabricación de botellas, lo que conduce a seleccionar la máquina que sea apropiada para el trabajo deseado dentro de la amplia gama de estas.

Finalmente se utiliza el programa SAP 2000, para analizar el comportamiento del triturador y ver sus posibles fallas con la finalidad de corregirlas. La aplicación del programa SAP 2000 en el presente trabajo brinda un panorama muy cercano a las condiciones de funcionamiento, lo que garantiza los resultados de este estudio.

2. Objetivo General.

Diseñar y analizar estructuralmente una trituradora de botellas de vidrio cuyo producto final esté listo para ser reciclado.

3. Composición del vidrio.

El vidrio está compuesto de forma principal por dióxido de silicio (SiO_2) en forma de arena. Para fabricar vidrio común se le añade carbonato sódico (Na_2CO_3) y piedra caliza (CaCO_3). La arena se encuentra presente en un 70 % y es denominada vitrificante, la sosa en 18 % y ayuda a fundir, recibiendo el nombre de fundente y la caliza en 10 % ayudando a estabilizar. El 2 % restante lo componen otras sustancias como plomo, boro, óxidos metálicos que ayudan a dar color al vidrio. [1].

La estructura del vidrio se muestra en la figura 1. La gráfica (a) es la estructura cristalina normal y la (b) corresponde a una estructura de silicato. Los tetraedros SiO_4 se encuentran fusionados compartiendo vértices en una disposición regular de largo alcance. En un vidrio corriente de sílice los tetraedros están unidos por vértices formando una red dispersa sin orden de largo alcance.

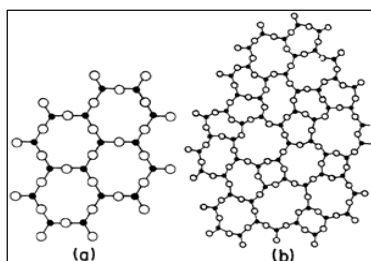


Figura 1. Estructura cristalina de vidrio (a) vítrea y (b) de silicato.

4. Propiedades del Vidrio.

4.1. Propiedades Físicas.

Las propiedades físicas del vidrio son aquellas que son apreciadas por nuestros sentidos, a simple vista son el color y la textura.

El color de los vidrios resultan de tres factores: el estado de oxidación del vidrio, de la cantidad específica de colorante utilizado y por los colores de solución.

La oxidación del vidrio es promovida por la adición del carbón, y el grado de oxidación es medida de forma arbitraria con una escala, conocida como los números de oxidación. El vidrio claro tiene número de carbón 0, el vidrio verde oscuro tiene número de carbón 28, y el vidrio de color ámbar o café tiene número de carbón 52.

La cantidad de específica del colorante utilizado se refiere a los elementos que se colocan en el proceso de fusión, y son llamados colorantes.

Los colores de solución donde el color se produce porque el óxido metálico presente absorbe la luz de la región visible del espectro, y deja pasar la que corresponde a algunos colores que son lo que se ven. De esta forma el cobre absorbe la luz con longitudes de onda que pertenecen a todos los colores menos el color rojo rubí. Por eso un vidrio que contenga Cu^{+1} se verá rojo rubí y el que contenga Cu^{+2} se verá color verde.

Tabla 1. Elementos que dan coloración al vidrio.

Elemento	Color
Óxido de cobalto	Rojo azulado
Óxido ferroso	Azul
Óxido férrico	Amarillo
Oxido de cromo	Verde grisáceo
Trióxido de cromo	Amarillo
Óxido de cobre	Verde azulado
Óxido de uranio	Verde amarillento fosforescente
Selenio elemental	Rosa
Sulfuro de cadmio coloidal	Amarillo

La textura de los vidrios puede variar en cuestiones de brillo, esto depende del proceso de fundido. Un vidrio completamente fundido presenta un brillo porque se nivela y aplanar cuando se funde formando una superficie extremadamente lisa. Cuando no se funde correctamente la superficie resulta ser muy rugosa y de color mate, haciendo que no haya transparencia.

4.2. Propiedades Químicas.

Dentro de las propiedades químicas del vidrio se encuentra la densidad. Existen vidrios que pueden tener densidades relativas con respecto al agua de 2 a 8, lo que implica que hay vidrios más ligeros que el aluminio y más pesados que el acero, pero esto es en estado puro.

La densidad del vidrio de botella que es el objeto del análisis varía entre 1.7 gr/cm^3 a 3.1 gr/cm^3 .

La densidad del vidrio aumenta al incrementar la concentración de óxido de calcio y óxido de titanio; pero disminuye considerablemente al aumentarse óxido de aluminio u óxido de magnesio.

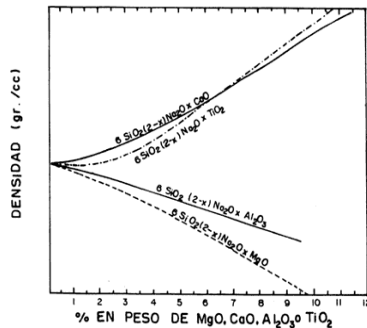


Figura 2. Gráfica de densidad versus porcentaje de compuestos presentes en el vidrio.

Otra propiedad química del vidrio es la viscosidad. La viscosidad es la propiedad que tienen los fluidos a fluir debido al rozamiento entre sus moléculas. Un material es viscoso es aquel que es muy denso y pegajoso. La viscosidad es muy importante porque esta determinará la velocidad de fusión.

No hay que confundirse al hablar de viscosidad en un vidrio, ya que ésta es una propiedad de los fluidos, pero el vidrio realmente es un líquido sobre enfriado, lo que significa que llega a mayores temperaturas que la de solidificación.

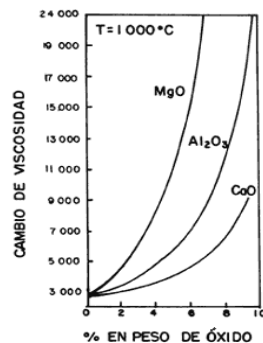


Figura 3. Gráfica de viscosidad versus porcentaje de compuestos presentes en el vidrio.

El vidrio es muy resistente a la última propiedad química que es la corrosión. En el medio ambiente son muy resistentes y no desisten ante el desgaste.

Sin embargo existen 4 propiedades que pueden hacer que el vidrio sucumba ante la corrosión y son las siguientes:

- Ácido hidrófluorídrico
- Ácido fosfórico de alta concentración.
- Concentraciones alcalinas a altas temperaturas.
- Agua super calentada.

4.3. Propiedades Mecánicas.

Como se conoce el vidrio no es dúctil ni maleable. No sufre deformación permanente por acción del esfuerzo, sino que alcanzado el límite de resistencia se produce su fractura. Torsión, Compresión, Tensión, Flexión son las propiedades mecánicas a las que un vidrio está sometido. [1].

La resistencia a la **torsión** se define como la capacidad para oponerse a la aplicación de una fuerza que provoque giro o dobléz en su sección. El vidrio no tiene esta propiedad cuando está en estado sólido, pero en estado de fundición si acepta la torsión, debido a que es una pasta y que depende de los elementos que le sean adicionados.

El vidrio tiene una resistencia a la **compresión** muy alta, siendo su resistencia promedio 1000 MPa.

Aquí se adjunta un gráfico que muestra los distintos porcentajes de compresibilidad para los distintos vidrios dependiendo de las temperaturas.

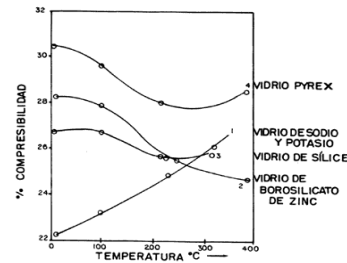


Figura 4. Gráfica de porcentajes de compresibilidad dependiente de temperaturas en los diversos tipos de vidrios.

Durante el proceso de fabricación de vidrio, este adquiere imperfecciones o grietas no visibles, las cuales cuando se le aplica una presión acumulan esfuerzos de tensión en dichos puntos, aumentando el doble la tensión aplicada, los vidrios por lo general soportan una resistencia a la **tensión** entre 3000 a 5500 N/cm^2 , aunque pueden soportar más cuando tienen un tratamiento especial. [1].

Caso contrario sucede con la **flexión**, ya que para cada composición de vidrios es distinta. Un vidrio sometido a flexión soporta en una de sus caras

esfuerzos de compresión y en otra cara esfuerzos de tensión, en todos los materiales sucede lo mismo.

La resistencia a la flexión en un vidrio es casi de 40 MPa.

4.4. Propiedades Térmicas.

Esta es una propiedad muy importante en los vidrios, debido a que en muchos casos los vidrios almacenan productos perecibles o que necesitan estar en un ambiente frío, como es el caso de los alimentos o bebidas, sin dejar de mencionar medicinas o productos químicos.

El vidrio tiene buenas propiedades térmicas, soporta con facilidad ambas temperaturas caliente y fría sin ningún problema.

La **conductividad térmica** del vidrio es de 0.002 cal/cm seg °C, mucho más baja que la conductividad de los metales. Sin embargo el vidrio tiene como propiedad de absorber la radiación que produce la luz ultravioleta e infrarroja, la cual es muy variable y puede provocar que el vidrio transmita calor de manera más efectiva que los metales.

4.5. Propiedades Ópticas.

Es la propiedad más interesante que tienen estos materiales, y que más se explota es su transparencia a la luz visible. Posee un comportamiento diferente en la zona ultravioleta e infrarroja del espectro. Una parte de la luz es refractada, otra parte es absorbida y otra es transmitida. Cada una de ellas llevará un porcentaje de la totalidad del rayo de luz que hizo contacto con el vidrio. Se crea un prisma de color al otro lado de la cara del vidrio y se forman colores que van desde el rojo hasta el violeta y los extremos son las luces que son imperceptibles al ojo humano como la luz ultravioleta e infrarroja.

4.6. Propiedades Eléctricas.

Los vidrios tienen dos propiedades eléctricas: la constante dieléctrica y la resistividad eléctrica superficial.

La constante eléctrica es la capacidad de almacenar energía eléctrica. La opacidad y la constante dieléctrica están relacionadas de manera inversamente proporcional, mientras más transparente sea el vidrio, mayor será su capacidad de almacenar energía.

La resistividad eléctrica superficial, es la resistencia que presenta el vidrio al paso de la corriente eléctrica, la cual es muy alta en este material, es de 10^8 veces más alta que el cobre.

5. Definición del vidrio.

Luego de presentar la composición del vidrio y sus propiedades, se puede concluir que el vidrio es una

sustancia dura, frágil, refringente y mala conductora del calor y de la electricidad.

El vidrio también es un material amorfo (que es poco ordenado en su estructura interna), inorgánicos, de fusión que han sido enfriados a una condición rígida sin cristalizarse, resistente al desgaste, la corrosión, y la compresión.

Sin embargo, la mejor definición del vidrio fue dada por la American Standard Testing Materials (ASTM), y es la siguiente: “El vidrio es un producto inorgánico de fusión, enfriado hasta llegar a la condición de rigidez sin cristalización”.

6. Diseño de trituradora.

Existen 5 tipos de trituradores para materiales en general y son los siguientes: molino de martillos, tambor rotatorio o de rodillo, trituradora de mandíbula o quijada, eje de impacto vertical y discos rotativos y barras rompedoras.

El molino de martillos es el más efectivo para desarrollar una adecuada trituración y pulverización.

Los molinos de martillos están formados por martillos de acero que al girar con la velocidad dada por el motor trituran el material de descarga.

A continuación se presenta las ventajas y desventajas que tiene el triturador de martillos.

Ventajas:

Produce un amplio rango de tamaño de partículas.

Trabaja con cualquier material y fibra.

Bajo costo de compra inicial comparado con los molinos de rodillos.

Bajo costo de mantenimiento.

Opera de forma descomplicada.

Desventajas:

Baja eficiencia de energía en comparación con el molino de rodillos.

Puede generar calor.

Puede generar ruidos y emisiones de polvo.

No hay uniformidad en el tamaño de partículas.

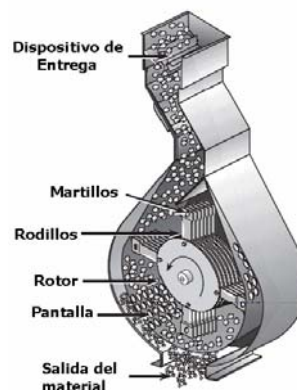


Figura 5. Esquema general de un molino de martillos.

Estas consideraciones del molino indican un amplio espectro de cómo trabaja, la disposición de los martillos, capacidad de carga y descarga, cantidad de energía a utilizar, montaje y desmontaje del molino para su mantenimiento, así como los costos de fabricación en el Ecuador.

Los molinos de martillos están formados por los siguientes elementos: martillos, ejes porta martillos, eje principal de potencia, elementos de sujeción, elementos de transmisión de potencia.

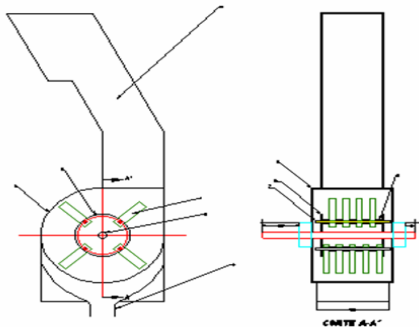


Figura 6. Esquema general del molino de martillos diseñado.

El ángulo de inclinación de la tolva se lo ha calculado de la manera convencional, utilizando la geometría y la fórmula que describe el ángulo de inclinación utilizando el coeficiente de rozamiento.

$$\theta = \tan^{-1} \mu_s \quad \text{ecuación 1.}$$

De acuerdo a las pruebas realizadas se obtuvo que el ángulo es de 44.4°. Como se observa en el gráfico dicho ángulo es mayor lo cual garantiza que el vidrio no se detendrá en el metal de la tolva de alimentación.

Los ejes secundarios son 4 y están alternados, siguiendo la dirección de las manecillas del reloj. En un eje 4 martillos en otro 5, hasta completarlos. Ambos extremos de los ejes se roscan para fijarlos al sistema de trituración, por medio de dos discos de separación que sujetan a los ejes secundarios.

Los ejes secundarios han sido calculados de acuerdo a la carga viva que es la fuerza de impacto, la carga muerta que es el peso del martillo, y de los momentos que soportan.

Como se mencionó anteriormente los ejes secundarios están unidos a discos separadores, en cantidad de 2, uno a cada extremo. Los discos porta ejes se llaman así porque realizan la labor de soportar a los ejes secundarios y al eje principal. Aseguran, balancean y transmiten la velocidad al sistema.

El aseguramiento del eje principal a los discos, se da por medio de chumaceras de pared. Ahorran espacio para poder montar y desmontar, así como para la colocación de la polea de transmisión.

Las dimensiones utilizadas para los **martillos** generalmente son (15x4x2.5) cm, y se obtiene como volumen 150 cm³. Para el cálculo del volumen se ha tenido en consideración que existen dos orificios del tamaño del diámetro del eje secundario, esto se hace para que una vez desgastado un lado del martillo, se pueda utilizar el otro lado.

Pero sólo se ha considerado hacer un orificio en el martillo, esto se lo explica en las conclusiones.



Figura 7. Diversos tipos de martillos utilizados en molinos.

La descarga del vidrio triturado ocurre de dos formas: por medio de la gravedad y por medio de la fuerza centrífuga que empuja a los pedazos hacia el interior del molino.

El sistema de transmisión de potencia funciona por medio de bandas, que están conectadas al eje de motor y al eje de la máquina por las poleas. Esto también se lo hace por seguridad, ya que se estima que las bandas sean la parte fusible en caso de que algún pedazo de material se traben en algún mecanismo interno. El sistema funciona por un motor de cuya capacidad será determinada. Pero debemos de tener en consideración que el motor debe ser de un voltaje de 220 voltios y trifásico, con frecuencia de 60 Hz, por ser un equipo industrial y que el costo de esa electricidad es más económico.

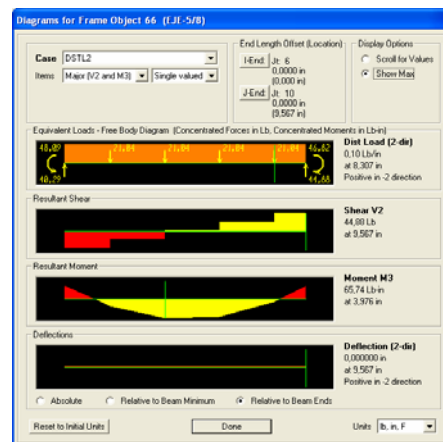


Figura 8. Diagrama del momento cortante y momento flector para el eje secundario de 4 martillos.

La máquina será construida con plancha de 6 milímetros o ¼ de pulgada, por condiciones de trabajo y facilidad de construcción la cual será validada con los resultados al realizar el análisis estructural.

Para esto es necesario conocer los materiales con sus respectivas dimensiones y saber si se encuentran en el mercado, ya que eso permite estimar el costo de fabricación, y de no encontrar algún elemento, ver de qué manera es reemplazado, por otro que cumpla con las características de diseño.

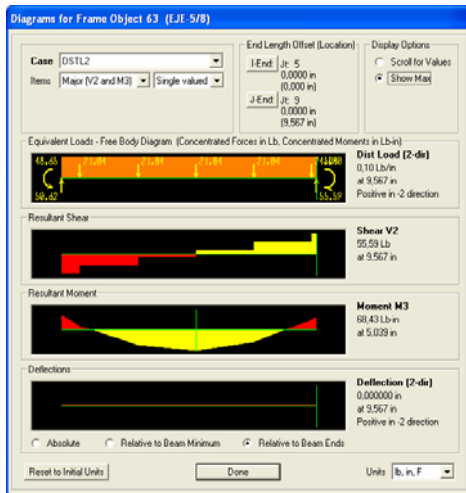


Figura 9. Diagrama del momento cortante y momento flector para el eje secundario de 5 martillos.

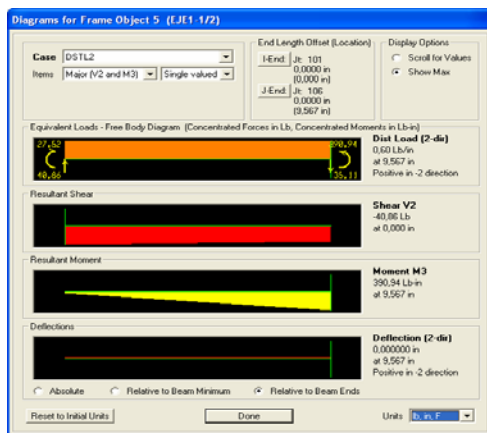


Figura 10. Diagrama del momento cortante y momento flector para el eje principal.

Por ejemplo en el mercado el tipo de aceros para máquinas está limitado a ciertas clases como el SAE 1018 generalmente y también en el diámetro, las medidas más frecuentes son de 1 pulgada en adelante. Lo mismo sucede con el material para los martillos, ya que se encuentran en ciertos espesores y, en ambos casos, estos son los materiales importantes del diseño.

Hay que considerar que también se realizó diseño de cuñas y chavetas para el eje del motor, y del eje principal de la máquina, que se seleccionaron previo al cálculo correspondiente el motor trifásico, el número de bandas, las poleas y las chumaceras.

En esta tesis es necesario hacer el análisis de costos del triturador comparado con una máquina de importación.

Los valores máximos que indican son los valores de diseño, en donde se puede realizar la búsqueda de materiales que soporten dichos esfuerzos. Los aceros de diferentes composiciones soportan valores esfuerzos a los referidos en los cálculos realizados por los métodos tradicionales de diseño y por el programa SAP 2000. Esto quiere decir que el triturador diseñado soportará las cargas y esfuerzos permitidos con una amplia facilidad, y garantiza la seguridad de ninguna falla.

6.1. Costos.

Se realiza un cálculo del costo total del molino, para esto se ha buscado en el mercado local los precios de los materiales.

Este cálculo contempla los siguientes rubros, valor de diseño, materiales, mano de obra.

Cant.	Pieza	Material	Precio
1	Motor trifásico 3 H.P.		\$ 532,80
8	Pernos de sujeción motor.	SAE 5	\$ 2,00
1	Eje 1 ½ “ diámetro.	AISI 1018.	\$ 15,62
4	Ejes 5/8” diámetro.	AISI 4340.	\$ 8,00
2	Discos porta ejes.	Acero A36.	\$ 42,55
1	Polea 2 canales.	Hierro.	\$ 35,43
1	Polea 2 canales.	Hierro.	\$ 45,10
2	Chumacera pared 4 orificios.	Acero	\$ 31,40
4	Graseras.	Hierro.	\$ 1,00
1	Cuña eje principal.	AISI 1018.	\$ 5,00
1	Cuña eje del motor.	AISI 1018.	\$ 5,00
8	Pernos de sujeción máquina.	SAE 5	\$ 4,00
2	Bandas en V tipo A.	Caucho y nylon.	\$ 33,6
18	Bocines separadores.	Bronce.	\$ 54,00

18	Martillos	Chronit 500	\$ 122,65
18	Martillos cementación.	CRHONIT (500HB)	\$ 136,80
	Pintura anticorrosiva.		\$ 6,00
	Sistema eléctrico.		\$ 70,00
		Costo	\$ 1195,95
		Mano de obra 60%	\$ 717,57
		Subtotal	\$ 1913,52
		I.V.A. 12%	\$ 229,62
		TOTAL	\$ 2143,14

7. Conclusiones y Recomendaciones.

7.1. Conclusiones.

El sistema seleccionado para trituración por medio de martillos, es el mejor, sin duda, luego de los análisis previos de factibilidad, debido a su rápida velocidad de trituración, lo que posibilita una mejora notable al diseñar la máquina trituradora con bajo consumo energético, de fácil montaje y desmontaje, así como mantenimiento sencillo.

Esta máquina es concebida con elementos netamente existentes en el mercado nacional, situación que abarató los costos de producción de los molinos que en el caso de realizarse en serie, disminuyen aún más; lo cual posibilita emplear mano de obra local, tanto para su producción como para los interesados en adquirir este tipo de maquinaria para la industria del reciclaje, generando un doble beneficio plenamente palpable.

Luego de realizar comparaciones entre los principales fabricantes de trituradoras, se pudo constatar que los precios fluctúan entre \$ 2000 y \$ 3400. de maquinaria importada, este factor añade costos extras a la producción como es la adición de aranceles, seguro de mercadería, bodegas, otro factor involucrado es el tiempo la desaduanización. El lapso que toma la llegada de la máquina al país y su salida de aduana, se lo ha tomado para la construcción de la trituradora diseñada, elaborada íntegramente en el país, en un tiempo de 30 días.

7.2. Recomendaciones.

Cuando un martillo sufre desgaste es recomendable restituirlo por uno nuevo, y no soldarlo para rellenar el desgaste. Se ha colocado un solo orificio en el martillo especialmente para evitar usar el extremo superior ya

que con el uso continuo el orificio sufre deformaciones.

En los discos porta ejes también se puede colocar un solo martillo, en forma de viga apoyada en los extremos con juntas que le permitan rotar.

En el diseño de esta máquina hay que considerar que no se ha colocado algún tipo de tamiz que permita que los pedazos vidrio triturado grandes no sean expulsados, esto se debe fundamentalmente a que el casco (vidrio triturado), se lo mezcla con los compuestos que sirven para la fabricación del vidrio durante el proceso de fabricación de una nueva botella, sin embargo se ha dejado espacio para que un tamiz sea colocado de acuerdo a los requerimientos de algún cliente.

8. Agradecimientos.

Al Ing. Ernesto Martínez por la dirección de esta tesis, así como para la empresa O-I, en persona del Ing. Tomás Guerrero que me prestaron las facilidades en su empresa, también al Ing. Juan Carlos Pindo, por sus consejos y al Sr. Gustavo Aveiga por las facilidades prestadas.

9. Referencias Bibliográficas

- [1]. VOGEL WERNER, Glass Chemistry, Editorial SPRINGER-VERLAG 1994 2da. Edición
- [2]. REINDL JOHN, Reuse and Recycling of glass cullet for containers and non containers uses, Abril 25 2003. La Industria Plástica en el Ecuador” Artículo de ASEPLAS-Asociación Ecuatoriana de Plásticos, Junio, 2008.
- [3]. REMADE SCOTLAND, Glass Reciclyng Handbook, 1ra Edición Julio 2004. Glasgow Caledonian University, Drummond House (3rd floor) 1Hill street.
- [4]. DIARIO EL TELEGRAFO, Lunes 17 de abril del 2006, Primera Parte pagina 2A, Sección de Economía.

Luis Andrés Abarca Carriel.
Estudiante

Ing. Ernesto Martínez L.
Director de Tesis