

41126
77



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN

DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA LIMPIEZA DE
"CULLET"

(DESPERDICIO DE VIDRIO)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
JULIO CÉSAR NÚÑEZ CUÉLLAR

ASESOR:
M. EN I. LEOPOLDO GÓNZALEZ GONZÁLEZ

MÉXICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2003



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**TESIS
CON
FALLA DE
ORIGEN**

GRACIAS.

A DIOS

POR HABERME DADO LA OPORTUNIDAD Y LA GRACIA DE REALIZAR TODOS MIS SUEÑOS HASTA EL DIA DE HOY.

A MIS PADRES

POR SU CARINO Y SU AMOR, POR DARME TODO LO QUE ESTUVO A SU ALCANCE PARA REALIZARME Y SER UN BUEN HIJO CADA DIA; POR HABERME ENSEÑADO A LOGRAR TODOS MIS OBJETIVOS, SIN IMPORTAR LOS OBSTÁCULOS DE LA VIDA; PORQUE USTEDES FUERON EL IMPULSO QUE ME LLEVO A LOGRAR ESTA META.

A MIS HERMANOS

POR HABER CONFIADO EN MÍ Y POR NO DEJARME CAER EN LOS MOMENTOS MAS DIFÍCILES DE MI VIDA; POR AYUDARME CON SUS PALABRAS DE ANIMO CUANDO MAS LAS NECESITE Y TERMINAR ASÍ MI CARRERA PROFESIONAL.

A TODOS.

LOS QUE NO MENCIONO PERO QUE SIN EMBARGO FUERON UN GRANTO DE ARENA DENTRO DE MI VIDA Y QUE ME AYUDARON INCONDICIONALMENTE.

GRACIAS A TODOS ELLOS QUE SIN SU AYUDA ESTO JAMAS HUBIERA SIDO POSIBLE.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Indice

Introducción.....iv

Antecedentesvi

Capitulo 1. Producción de vidrio flotado

1.1 Marco histórico1-1

1.2 Métodos de fabricación del vidrio1-1

1.3 Propiedades del vidrio1-3

1.3.1 Propiedades físicas.....1-4

1.3.2 Propiedades mecánicas.....1-5

1.3.3 Propiedades térmicas.....1-6

1.3.4 Características químicas.....1-8

1.4 Fabricación del vidrio flotado1-8

1.5 Situación actual de la fabricación de vidrio flotado en México1-13

1.6 Cullet como materia prima.....1-15

1.6.1 Beneficios1-15

1.6.2 Cullet foráneo1-16

1.6.3 Especificaciones.....1-16

Capitulo 2. Defectos ocasionados por los contaminantes en el vidrio flotado

2.1 Defectos del vidrio2-1

2.2 Origen de los contaminantes2-6

Capítulo 3. Métodos existentes para la separación de los materiales contaminantes del cullet

3.1	Separación de metales ferrosos	3-1
3.1.1	Principio de operación	3-1
3.1.2	Tipos de imanes	3-2
3.1.3	Equipos disponibles comercialmente	3-3
3.2	Separación de metales no ferrosos	3-10
3.2.1	Separación por análisis químico	3-10
3.2.2	Separación por corrientes de Eddy	3-10
3.2.3	Separación mediante ensayo por chispas o destellos	3-11
3.2.4	Separación por el efecto pirómetro	3-12
3.2.5	Separación por medio de excitación laser	3-12
3.3	Separación de materiales orgánicos	3-13
3.3.1	Separadores de gravitación a presión	3-14
3.3.2	Separación mediante despedregadores	3-15
3.3.3	Mallas separadoras a base inercia	3-17
3.3.4	Incineración	3-19
3.4	Separación de materiales cerámicos y refractarios	3-21
3.4.1	Equipo disponible comercialmente	3-23
3.5	Separación de finos	3-24

Capítulo 4. Selección de equipo

4.1	Definición de los sistemas funcionales	4-1
4.2	Selección del método para la separación de metales ferrosos	4-1
4.2.1	Especificaciones de diseño	4-1
4.2.2	Selección del equipo para separación de metales ferrosos	4-3
4.2.3	Criterios para seleccionar el equipo	4-4

4.3	Selección del método para la separación de metales no ferrosos	4-8
4.3.1	Especificaciones del equipo de separación de metales no ferrosos.....	4-9
4.3.2	Descripción de los equipos comerciales para la separación de metales no ferrosos.....	4-9
4.3.3	Criterios de selección para los equipos separadores de metales no ferrosos.....	4-14
4.4	Selección de equipo para la separación de materiales orgánicos.....	4-15
4.5	Selección del método para la separación de materiales cerámicos y refractarios.....	4-20
4.5.1	Selección del equipo	4-20

Capítulo 5. Integración del Sistema

5.1	Resumen de las características de los equipos comerciales seleccionados.....	5-1
5.2	Propuesta del proceso de separación de contaminantes del cullet.....	5-3
5.3	Sistema de lavado de cullet.....	5-48
5.3.1	Diseño del medio de transporte para cullet última etapa	5-48
5.3.2	Diseño del sistema de lavado de cullet	5-61

Capítulo 6. Conclusiones.....6-1

Bibliografía..... B-1

E

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Introducción

Desde hace algunos años, el sector industrial en el mundo sigue una tendencia cada vez más fuerte a utilizar los residuos de los diferentes procesos de transformación, que anteriormente eran desechados sin tener en cuenta ni el efecto acumulativo en el medio ambiente circundante ni el valor residual implícito en estos materiales.

Esta tendencia ha afectado a todas las industrias, que buscan utilizar primero los residuos de sus propios procesos y después los residuos de industrias similares, para reducir la compra de materias primas y el costo de fabricación.

Este reciclamiento significa en realidad una optimización de los recursos materiales y económicos disponibles, que aprovecha al máximo su utilización.

La industria del vidrio no escapa a esta tendencia, y desde hace algunos años busca utilizar los desperdicios generados en la producción, así como los resultantes del uso posterior de los productos de vidrio (envases, recipientes, vidrio de ventanas, etc.), para introducirlos como materia prima en sus hornos de fundición para la producción de vidrio nuevo.

En el caso específico de la industria del vidrio plano flotado, se presentan situaciones particulares al intentar reciclar los desperdicios de vidrio. Estos desperdicios, a diferencia de otras industrias del vidrio en las que no existen especificaciones estrictas, deben cumplir con ciertos requisitos que eviten afectar la calidad del vidrio producido a partir de ellos, así como la vida útil de los hornos en los que se procesan.

Estos requisitos están relacionados principalmente con el contenido de ciertos materiales ajenos a los desperdicios, que se consideran como contaminantes, cuyos efectos son nocivos y que afectan las propiedades físicas y químicas del vidrio producido a partir de ellos, así como el funcionamiento y durabilidad de los hornos en los que se procesan.

Por lo anterior, en el primer capítulo de este trabajo, se reseña una breve historia sobre la producción del vidrio, haciendo énfasis en el vidrio plano flotado al cual se refiere este trabajo.

En el segundo capítulo se dan a conocer los materiales que resultan contaminantes en la producción del vidrio, así como los efectos causados por cada uno de ellos en el producto final.

En el capítulo tres se enumeran los diferentes métodos existentes para la eliminación de los materiales contaminantes del cullet, así como los equipos disponibles comercialmente.

8

En el capítulo cuatro se efectúa una selección de aquellos equipos comerciales disponibles para la separación de cada uno de los materiales contaminantes.

Posteriormente, en el capítulo cinco se hace una integración del sistema de limpieza del cullet y se procede a diseñar los equipos no disponibles comercialmente, definiendo finalmente la configuración de dicho sistema.

Finalmente, en el capítulo seis se hace una reseña de las conclusiones alcanzadas durante la elaboración del trabajo, puntualizando las ventajas que reporta la implantación de este tipo de sistemas en el proceso de la producción del vidrio plano flotado.

Antecedentes

El proceso actual de fabricación de vidrio plano a través del método de flotado, contempla la reutilización del desperdicio de vidrio llamado "Cullet" que se genera en el propio proceso y que puede ser el resultado de la separación de los bordes, producto fuera de especificaciones, producto resultante de "estrelladas" durante el proceso, etc.

Los objetivos principales del uso del cullet en la producción del vidrio son dos:

- Sustituir materia prima virgen
- Disminuir el consumo de energía necesario para la fundición

Como se puede apreciar, ambas acciones involucran un ahorro económico en los insumos para la producción del vidrio. Si se parte de esta sencilla apreciación, se puede suponer que mientras más cullet se emplee en la producción del vidrio, mejores serían los márgenes de utilidad, y efectivamente, esta situación está más que comprobada.

Sin embargo, existe una fuerte limitante para la disposición de volúmenes considerables de cullet, ya que mientras mayor es la eficiencia de producción de vidrio, menor es la generación de cullet.

Es aquí donde se abre un área de oportunidad considerable, la cual consiste en contar con cullet que NO se genera por el propio proceso, sino en otras plantas, al que se le conoce como cullet foráneo.

El cullet foráneo puede llegar a ser de gran utilidad, pero su utilización representa un alto riesgo, ya que debido a la forma de recolección y de transportación, este material suele venir acompañado de contaminantes que provocarían que el hecho de utilizar dicho cullet, en vez de representar un beneficio, pudiera generar grandes pérdidas de producción y daños al horno (principal equipo para la producción del vidrio).

Los contaminantes que puede contener una carga común de cullet foráneo se pueden separar en tres grandes grupos:

- Contaminantes metálicos
- Contaminantes orgánicos
- Contaminantes cerámicos

Siendo principalmente los contaminantes metálicos y los cerámicos los que más impactan la generación de irregularidades en el proceso.

Es por esto que resulta importante contar con un proceso (integrado por una serie de equipos) que pueda eliminar los contaminantes asociados a una carga común de cullet foráneo; para que de esta manera, los volúmenes que se empleen en el proceso de producción de vidrio plano por medio del método de flotado, sean considerablemente mayores.

Por último, se tienen referencias de que actualmente se encuentran trabajando en la planta de Vidrio Plano de México equipos fabricados empíricamente, que se encargan de llevar a cabo una separación y lavado del cullet foráneo, con una importante utilización de mano de obra.

Es por lo cual, que en este trabajo se presenta una propuesta de integración y diseño de un sistema para separar elementos metálicos y refractarios de una carga de cullet para disminuir las pérdidas en la producción de vidrio flotado atribuibles a dichos contaminantes y favorecer de esta manera la vida útil del horno de fundición y reducir el consumo del combustible empleado.

Capítulo I

Producción de vidrio flotado

1.1. Marco Histórico.

Los primeros objetos de vidrio que se fabricaron fueron cuentas de collar o abalorios, pero las vasijas huecas no aparecieron hasta el año 1500 A.C. Es probable que fueran artesanos asiáticos los que establecieron la manufactura del vidrio en Egipto, de donde proceden las primeras vasijas producidas durante el reinado de Tutmosis III (1504-1450 A.C.). La fabricación del vidrio floreció en Egipto y Mesopotamia hasta el año 1200 A.C. y posteriormente cesó casi por completo durante varios siglos. Egipto produjo un vidrio claro, que contenía sílice pura; lo coloreaban de azul y verde. Además de vasos hacían figurillas, amuletos y cuentas, así como piezas vítreas para incrustaciones en muebles. En el siglo IX A.C. Siria y Mesopotamia fueron centros productores de vidrio, y la industria se difundió por toda la región del Mediterráneo. Durante la época helenística Egipto se convirtió, gracias al vidrio manufacturado en Alejandría, en el principal proveedor de objetos de vidrio de las cortes reales. Sin embargo, fue en las costas fenicias donde se desarrolló el importante descubrimiento del vidrio soplado en el siglo I A.C. Durante la época romana la manufactura del vidrio se extendió por el Imperio, desde Roma hasta Alemania.

El vidrio para las ventanas se utiliza desde el siglo I D.C. y al principio se hacía por colado o soplado de cilindros huecos que luego se cortaban y apisonaban formando una lámina. El proceso del vidrio de corona es posterior y consistía en el soplado y moldeado de la masa vítreo para convertirla en un globo aplastado o corona. Después se apoyaba la parte plana sobre una base y se retiraba la caña de soplar.

1.2. Métodos de Fabricación del Vidrio

A lo largo de la historia del vidrio, han sido varios los métodos utilizados para la fabricación de vidrio plano, dichos métodos han pasado, gracias a un importante esfuerzo tecnológico, de los antiguos sistemas de soplado a boca, a los modernos sistemas de flotado; en los siguientes puntos se describe resumidamente los principales métodos que han sido usados.

Soplado a boca.

El origen de este método se remonta al siglo X y consistía en formar una esfera de vidrio fundido mediante soplado con caña, mediante balanceos, se conseguía que el vidrio

tomara la forma de un cilindro. finalmente se cortaba el cilindro a lo largo de una de sus generatrices y se aplanaba con un rodillo de madera.

Soplado mecánico.

Básicamente consiste en la mecanización del proceso anterior, este sistema fue inventado a principios de siglo y como el anterior, consistía en la formación de grandes cilindros que posteriormente se cortaban y aplanaban.

Estirado mecánico

La idea de este sistema es la de conseguir extraer verticalmente, a partir de un baño de vidrio fundido, una lámina rectangular continua de vidrio que, inmediatamente después de emerger, fuese cuidadosamente enfriada. También fue desarrollado a principios de siglo, pero debido a diversas dificultades prácticas, dicho sistema ha caído en desuso.

Laminado continuo

Gracias al desarrollo de grandes hornos, surgieron en 1932 los sistemas de laminado continuo. En este sistema el vidrio fundido contenido en una balsa se le hace rebosar por uno de los extremos del horno y se desliza hasta llegar a los rodillos laminadores. La lámina de vidrio avanza horizontalmente mientras se produce su enfriamiento.

Vidrio flotado

El procedimiento de fabricación de vidrio plano por el método de flotado ha supuesto una revolución industrial en este sector. Dicho método fue desarrollado por la compañía Pilkington en 1959 y en la actualidad prácticamente todos los vidrios usados en la construcción son fabricados por flotado. Se denomina flotado debido al proceso de fabricación que consiste en fundir el vidrio en un horno balsa para a continuación hacerlo pasar a una cámara en la que existe un baño de estaño fundido, de manera que el vidrio flota sobre él, se extiende y avanza horizontalmente, al salir de la cámara pasa por un túnel de recocido y finalmente se corta. Por este método se consiguen vidrios de una elevada calidad, a lo que hay que añadir una capacidad de producción muy elevada, por ejemplo, para un espesor de 6 mm se pueden alcanzar 240 [m/h].

1.3. Propiedades del vidrio

Los sólidos se pueden dividir en dos categorías: cristalinos y amorfos. Un sólido cristalino tiene rigidez y orden de largo alcance, es decir que sus átomos, moléculas o iones muestran una disposición tridimensional regular. Los sólidos amorfos carecen de disposición definida de orden molecular de largo alcance. A partir de estas definiciones se puede comprender mejor el concepto de vidrio; la ASTM (American Society for Testing

Materials) define el vidrio como un producto ópticamente transparente que resulta de la fusión de materiales inorgánicos que al enfriarse adquieren un estado rígido sin cristalizar, de aquí se infiere que el vidrio es un sólido amorfo; a pesar de que actualmente se utiliza un vasto número de vidrios orgánicos y que se fabrican vidrios por técnicas diferentes a la fusión, tales como condensación de vapores e irradiación de neutrones, la definición del vidrio dada por la ASTM es suficiente para el área de influencia de este trabajo y sólo se harán algunas precisiones. El mecanismo de formación del vidrio se estudia utilizando los diagramas de entalpía o volumen versus temperatura, como se muestra en la figura 1.1.

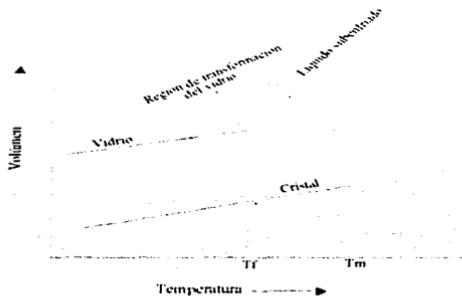


Figura 1.1 Diagrama V-T

Se puede imaginar un volumen pequeño de líquido a una temperatura por encima de la temperatura de fusión de esa sustancia; al tiempo que se enfría el líquido, la estructura atómica de la mezcla fundida cambiará gradualmente y se volverá más y más viscosa de forma continua. Para los materiales cristalinos existe un decremento discontinuo en el volumen a la temperatura de fusión (T_m); sin embargo, para el vidrio no existe una temperatura definida en la cual el líquido se transforme en sólido, sino que la transformación ocurre sobre un rango de temperatura. Si se extrapolan las líneas de vidrio y de líquido subenfriado (líquido subenfriado significa que no está a punto de evaporarse), se interceptan en una temperatura denominada temperatura fictiva (T_f), la cual se utiliza para caracterizar la historia térmica del vidrio.

1.3.1. Propiedades físicas

Las propiedades del vidrio dependen de la clase y proporción de las materias primas que intervienen en su composición, por lo que la variedad de vidrios es muy amplia. A continuación se mencionan tres de los tipos más representativos.

Vidrio de cuarzo puro: 100% SiO_2 . Expansión térmica baja, transparente a una amplia gama de longitudes de onda. Utilizado en investigación óptica.

Vidrio Pyrex: SiO_2 (60-80%), B_2O_3 (10-25%), Al_2O_3 (pequeña cantidad). Expansión térmica baja, transparente a la radiación visible e infrarroja pero no a la UV, utilizado sobre todo en el laboratorio y en recipientes domésticos para cocinar.

Vidrio de sosa-cal: También llamado vidrio común, vidrio base, vidrio de silicato sodocálcico, está compuesto por:

- | | |
|--|----------|
| • Sílice (SiO_2), material vitrificante | 69 a 74% |
| • Óxido de Sodio (Na_2O), fundente | 12 a 16% |
| • Óxido de calcio (CaO), estabilizante | 5 a 12% |
| • Óxido de magnesio (MgO) | 0 a 6% |
| • Óxido de aluminio (Al_2O_3) | 0 a 3% |

Fácilmente atacable por sustancias químicas y sensible a los choques térmicos. Transmite la luz visible pero absorbe la radiación UV. Usado sobre todo en ventanas a partir de la fabricación del llamado vidrio plano.

Además de estos componentes, el vidrio plano puede contener también pequeñas cantidades de otras sustancias. Los fundentes alcalinos, por lo general carbonato de sodio o potasio, disminuyen el punto de fusión y la viscosidad de la sílice. La piedra caliza o la dolomita (carbonato de calcio y magnesio) actúan como estabilizante.

Color

Las impurezas en las materias primas afectan al color del vidrio. Para obtener una sustancia clara e incolora, los fabricantes añaden manganeso con el fin de eliminar los efectos de pequeñas cantidades de hierro que producen tonos verdes y pardos. El cristal puede colorearse disolviendo en él óxidos metálicos, sulfuros o seleniuros. Otros colorantes se dispersan en forma de partículas microscópicas.

Densidad

La densidad de un material es definida como la masa de la sustancia por unidad de volumen, o

$$\rho = \frac{M}{V}; \quad \text{donde } \rho \text{ es la densidad, } M \text{ es la masa, y } V \text{ es el volumen de la muestra}$$

Si la muestra está libre de burbujas, vacíos, u otros defectos, la densidad calculada es la *densidad real* del material. Sin embargo, si la muestra contiene burbujas, lo cual ocurre ocasionalmente en el caso de los vidrios, la densidad calculada será menor y se llamará *densidad aparente*.

La densidad de un vidrio sosa-cal es de 2500 [Kg/m³], lo que supone, para un vidrio plano, una masa de 2.5 Kg por m² y un milímetro de espesor.

1.3.2. Propiedades Mecánicas.

Durante su uso, el vidrio puede estar sometido a esfuerzos mecánicos de diferente tipo: tracción, compresión, torsión, impacto y penetración. El comportamiento del vidrio bajo estos esfuerzos depende de varios factores, entre los que se encuentran la rigidez de los enlaces entre las moléculas que lo constituyen y, principalmente, el estado de su superficie. En la superficie del vidrio existen fisuras microscópicas que actúan como lugares de concentración de las tensiones mecánicas y en consecuencia como centros de iniciación de posibles fracturas, debido a la imposibilidad de eliminar estos defectos microscópicos la resistencia mecánica real del vidrio está muy por debajo de su resistencia teórica, otra de las consecuencias de estas microfisuras superficiales es que la resistencia a la compresión de un vidrio es mucho más elevada que la resistencia a la tracción, por lo que un vidrio rompe siempre a tracción.

Cuando se intenta medir la resistencia del vidrio, se encuentra que el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación no es factible realizarlo mediante el ensayo utilizado para los metales, entre otras razones, es muy difícil preparar la geometría requerida de los especímenes y sujetarlos sin fracturarlos, por lo tanto se utiliza un ensayo de flexión más adecuado a sus características. En este método un espécimen de sección circular o rectangular se flexiona hasta la fractura utilizando una técnica de tres o cuatro puntos de carga de acuerdo con norma ASTM C 1161. El esfuerzo en la fractura que se obtiene con este método es conocido como *resistencia a la flexión*.

Resistencia a la flexión

Para un vidrio sosa-cal, la resistencia típica a la rotura por flexión es de 69 [Mpa].

Elasticidad

A partir del ensayo de flexión se puede obtener una gráfica del comportamiento esfuerzo-deformación, en la cual la pendiente de la curva en la región elástica es el módulo de elasticidad. Para un vidrio sosa-cal, el valor del módulo de elasticidad es:

$E = 69 \text{ [GPa]}$

Dureza

La dureza del vidrio (su resistencia al rayado) es de 6.5 en la escala de MOHS, lo que representa una dureza ligeramente inferior a la del cuarzo.

1.3.3. Propiedades Térmicas

El vidrio es un mal conductor del calor y la electricidad, por lo que resulta práctico para el aislamiento térmico y eléctrico. Las propiedades térmicas del vidrio se pueden describir por tres constantes intrínsecas al material:

Capacidad térmica específica "c"

La capacidad térmica específica es la propiedad que indica la habilidad de un material para absorber calor de los alrededores; representa la cantidad de energía necesaria para producir un incremento de un grado en la temperatura de la unidad de masa de un material. Como el calor específico varía con la temperatura del material, se suele dar su valor a 20°C.

$$c_{\text{vidrio}} = 840 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Coefficiente de conductividad térmica "λ"

La propiedad que caracteriza la habilidad de un material para transferir calor de una región de alta temperatura hacia una de baja temperatura en una sustancia es la conductividad térmica o coeficiente de conductividad térmica, la cual se define mejor en términos de la expresión:

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \lambda = \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Donde Q denota el flujo de calor en [W] a través de un área A cuando existe un gradiente de temperatura dT/dx a través del medio conductor. Para un vidrio sosa-cal, el valor del coeficiente de conductividad térmica es:

$$\lambda_{\text{vidrio}} = 1.7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Coefficiente de dilatación lineal " α_L "

El coeficiente de expansión térmica de un material es una medida de la rapidez de cambio de volumen, y por lo tanto de la densidad, con la temperatura. Como este valor es difícil de medir, el coeficiente de expansión se determina usualmente en una dirección y se le llama coeficiente lineal de expansión térmica, α_L .

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \left(\frac{\Delta L}{\Delta T} \right) \quad \alpha_L = \left[\frac{m}{m \cdot K} \right]$$

Donde L es la longitud inicial del material, ΔL es el cambio en la longitud y ΔT es el cambio en la temperatura. Para el vidrio, en el intervalo de 20 a 200°C el coeficiente de dilatación lineal es:

$$\alpha = 9 \times 10^{-6} [K^{-1}]AQ$$

Como los vidrios son usualmente materiales isotrópicos (las propiedades son iguales en todas las direcciones) el coeficiente de expansión térmica se puede aproximar con muy poco error como tres veces el coeficiente lineal de expansión térmica.

En un acristalamiento, existen tres posibles mecanismos de transmisión de calor:

Conducción

El calor se transmite por conducción a través de un medio material (sólido, líquido o gas). Las moléculas calientes comunican parte de su energía de vibración a sus vecinas más frías continuando dicho proceso a lo largo de todo el material.

Convección

Esta forma de transmisión de calor es propia de líquidos y gases. La diferencia de temperatura provoca diferencias de densidad que a su vez dan lugar a movimientos en el fluido; el más caliente sube y es reemplazado por otro más frío. Si además el fluido posee algún otro tipo de movimiento se dice que hay convección forzada.

Radiación.

Todo cuerpo emite energía electromagnética de manera continua, la cantidad de energía y el espectro de emisión dependen de la temperatura del cuerpo y de sus propiedades emisivas. Este mecanismo no precisa de contacto material por lo que tiene lugar incluso en el vacío.

1.3.4. Características Químicas

Resistencia al agua.

El agua ataca al vidrio disolviendo algunos de sus componentes lo que se manifiesta por pequeñas pérdidas de masa. La intensidad del ataque depende de varios factores: la temperatura, el tiempo de contacto, la composición del vidrio, la agitación y el estado de la superficie. A temperatura ambiente el ataque es insignificante, la pérdida de masa después de estar sumergido durante horas es prácticamente inapreciable. Al aumentar la temperatura, la intensidad del ataque crece exponencialmente.

Resistencia a los agentes atmosféricos.

El ataque al vidrio por agentes atmosféricos puede ocasionar la aparición en su superficie de manchas y desescamaciones. El principal responsable de dicho ataque es el agua contenida en la atmósfera que se condensa frecuentemente sobre la superficie fría del vidrio. Esta pequeña cantidad de agua superficial es más peligrosa que gran cantidad de agua fluyendo ya que da lugar a una disolución concentrada de $\text{Na}(\text{OH})$ que ataca al vidrio. Resulta por consiguiente aconsejable evitar en lo posible la condensación. El resto de los gases atmosféricos no atacan al vidrio.

1.4. Fabricación del vidrio flotado

El proceso de fabricación del vidrio flotado se divide en cinco etapas principales (ver figura 1.2), que son:

- Preparación de la materia prima
- Fundición
- Formación
- Recocido
- Corte



Figura 1.2. Proceso de fabricación del vidrio flotado.

En la etapa de preparación de materia prima se reciben y almacenan los diferentes elementos que formarán la mezcla final, estos elementos son: arena sílica, carbonato de sodio, dolomita, sulfato de sodio, y óxido de hierro; posteriormente estos materiales son trasladados hacia los silos (tanques) de consumo diario, los cuales son extraídos de éstos de acuerdo a la formulación preestablecida y pesados en básculas digitales, las descargas de éstas son enviadas a una mezcladora de paletas en donde además se adiciona agua fundamentalmente con la intención de disminuir la volatilidad del producto en el trayecto hacia la siguiente etapa, la descarga de la mezcladora es conducida por medio de una serie de bandas transportadoras hasta la zona de alimentación del horno.

En la última sección de esta trayectoria se adiciona un cierto porcentaje de cullet, que se junta a la mezcla proveniente del edificio de materias primas y de esta manera se depositan ambos en la tolva del alimentador.

La fundición se lleva a cabo en un horno tipo regenerativo con quemadores de gas y está dividido como se muestra en la Figura 1.3, en forma longitudinal en cuatro zonas que son: fundidor, refinador, zona de homogeneización y zona de trabajo o de acondicionamiento y en forma transversal: en taza, superestructura y corona.

La mezcla se introduce en el bolsillo del horno por medio de un alimentador tipo reciprocante, esto genera que se formen bloques de mezcla comúnmente llamados troncos, en este punto, el vidrio adquiere una temperatura de 1200°C y se va incrementando hasta llegar a su máximo de alrededor de 1600°C , aproximadamente al centro de la zona de fundición.

Este "chorreo" se lleva a cabo a través de una compuerta hecha de refractario; en este punto la temperatura del vidrio es de entre 1,000 y 1,100°C dependiendo del color de vidrio que se esté produciendo.

Antes de continuar con la siguiente fase del proceso es importante mencionar que en la construcción del horno se emplean materiales refractarios de diferentes composiciones dependiendo de la zona donde se vayan a instalar. Este refractario se encuentra soportado por una gigantesca estructura metálica con tensores a todo lo largo del cuerpo del horno.

También es importante mencionar que todos los accesorios que se emplean en la zona del horno son enfriados por agua a través de un circuito cerrado.

La parte principal de la estructura metálica, así como el refractario de la taza del horno son enfriados por aire proveniente de ventiladores centrifugos.

Continuando con la fase de formación, el vidrio que ha chorreado proveniente del horno cae sobre una alberca de estaño formando así una capa de vidrio cuyo espesor y ancho serán modificados por el número, posición, ángulo y velocidad de las máquinas atenuadoras, como se muestra en Figura 1.4.

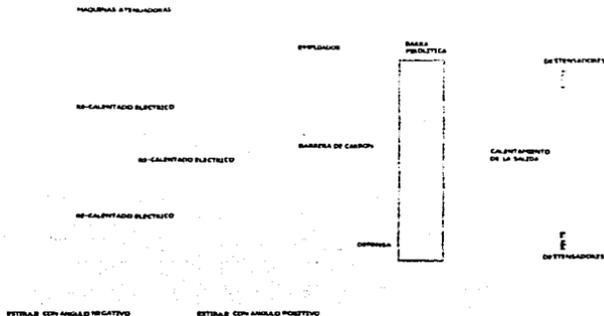


Figura 1.4. Máquinas atenuadoras

El vidrio que se encuentra flotando, forma lo que se conoce como "listón de vidrio". La temperatura del vidrio va descendiendo, ya sea en forma natural o por enfriamiento inducido, hasta lograr que al abandonar la fase de formación cuente con una temperatura de alrededor de 610°C.

Esta fase de formación se lleva a cabo en un equipo conocido como cámara de flotado que está compuesta por tres partes principales, una tina metálica inferior recubierta por refractario conteniendo estaño en fase líquida; una cubierta metálica superior suspendida, forrada con refractario y conteniendo un sinúmero de resistencias eléctricas; la tercera parte son cajas de sello que cubren el espacio que existe entre ambas cubiertas a todo lo largo de la cámara de flotado.

En esta fase también se cuenta con diferentes equipos accesorios tales como rieles de enfriamiento, motores lineales, empujadores, barreras de carbón, defensas de carbón y periscopios.

Un aspecto interesante de esta fase es que a la cámara de flotado se introduce una mezcla de nitrógeno e hidrógeno conocido como atmósfera para propiciar una condición inerte que ayude a eliminar las probabilidades de oxidación del estaño ya que esto propiciaría defectos en la calidad del producto.

Justo en la frontera entre esta fase y el recocido, se encuentra un área en la cual se deposita bióxido de azufre (SO₂) por la parte inferior del listón de vidrio. Esto se hace con la finalidad de proteger esta superficie del contacto que tendrá con los roles a lo largo del recocido.

Una vez que el listón de vidrio abandona la alberca de estaño, se monta sobre los roles que lo transportarán a todo lo largo del proceso de recocido como se muestra en la Figura 1.5. En esta fase, el vidrio se somete a diferentes condiciones de temperatura, ya sea calentamiento a través de resistencias, o enfriamiento a través de aire, buscando distribuir los esfuerzos a todo lo ancho del listón para lograr darle la resistencia mecánica requerida y la facilidad al corte que se llevará a cabo en la siguiente etapa.

En esta fase se cuenta principalmente con tres conjuntos de equipos que son la transmisión mecánica para los roles, las resistencias eléctricas en las primeras zonas del recocido y ventiladores centrifugos a todo lo largo de esta fase.

La última fase del proceso es conocida como línea de corte. Aquí se lava el vidrio, se inspecciona por medio de un equipo explorador ("scanner") y se secciona en forma automática de acuerdo a la información introducida al procesador que controla esta actividad.

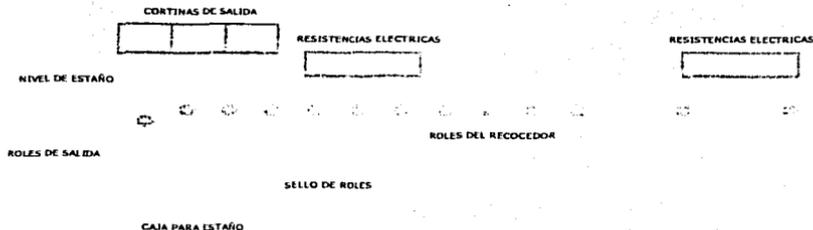


Figura 1.5.

La línea de corte es un conjunto de rodillos que transportan ya sea el listón del vidrio o las láminas del vidrio ya cortadas hacia los diferentes destinos o "piernas" de donde son retiradas y depositadas en unos carros que las llevarán a la bodega de producto terminado.

La actividad de retirar las láminas de los transportadores y posicionarlos en los carros se puede llevar a cabo de manera manual, semiautomática o totalmente automática.

1.5 Situación actual de la producción de vidrio flotado en México

En la República Mexicana se encuentran cuatro hornos para producción de vidrio flotado[1], dos en Villa de García, Nuevo León pertenecientes al grupo Vitro de México, uno en Tlalnepantla Estado de México, perteneciente al mismo grupo y uno más en Cuautla Morelos, perteneciente al grupo Saint Gobain de Francia.

Los datos que a continuación se mencionarán corresponden únicamente a los hornos del grupo Mexicano.

Se producen anualmente un promedio de 90 millones de metros cuadrados reducidos*, de los cuales un 50% se destina al mercado de exportación, un 20% al mercado automotriz y el 30% restante al resto del mercado nacional, como se muestra en la Figura 1.6.

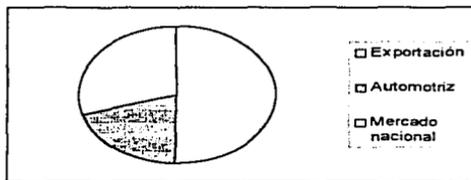
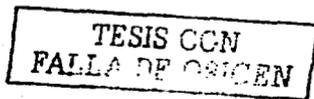


Figura 1.6 Producción nacional de vidrio flotado

El mercado nacional ha registrado un descenso considerable en los últimos años para los productores mexicanos, debido principalmente a la instalación del horno en Cuautla por la compañía francesa y a que cada vez se registran mayores volúmenes de importación provenientes de compañías como Gardian (inglesa), Asahi (japonesa) y PPG (norteamericana).

En los hornos nacionales se pueden producir hasta ocho colores de vidrio diferente que son:

- Claro
- Gris
- Bronce
- Azul
- Verde
- Verde claro
- Verde oscuro
- Gris oscuro



El color que se produce en mayor variedad de espesores es el claro y va desde 1.6 [mm] hasta 19 [mm], en los demás colores, los espesores promedio van de 3 a 8 [mm].

* La unidad de medida del vidrio plano es el metro cuadrado reducido, equivalente a un metro cuadrado de vidrio, con un espesor de 2

1.6 Cullet como materia prima

Como se mencionó anteriormente, el proceso para la producción de vidrio flotado contempla un cierto porcentaje de cullet como elemento integrante de la mezcla de carga que se introduce al horno.

La determinación de este porcentaje depende principalmente del color del vidrio que se desea producir.

Así, para la producción de vidrio claro se ha encontrado que el máximo porcentaje de cullet que se puede introducir al horno es del 35%, mientras que cuando se produce vidrio de color, este porcentaje puede aumentar hasta llegar al 80%, por ejemplo, para el vidrio gris.

La razón principal para que se presente esta diferencia, es que a mayor porcentaje empleado de cullet, mayor es la retención de colorantes en la masa del vidrio, lo que puede ocasionar que el vidrio claro comience a presentar un tono verdoso.

1.6.1 Beneficios

La utilización del cullet como elemento de la mezcla de materia prima, ofrece fundamentalmente tres grandes beneficios:

Económicos directos

El costo promedio de una tonelada de cullet equivale aproximadamente al 45% del costo de una tonelada de materia prima "virgen".

Es decir, que si alimentar una tonelada de materia prima "virgen" al horno cuesta \$1,000, alimentar la misma cantidad de cullet al horno cuesta aproximadamente \$450.

Económicos indirectos (ahorro de energía)

Uno de los elementos que componen la mezcla de materia prima virgen es la sosa, esto no es otra cosa mas que un fundente indispensable, que permite que la arena silica, que es el componente principal de la mezcla, pueda fundirse a una temperatura máxima de 1,600°C.

Sin embargo, en el cullet, la sosa ya se encuentra integrada a los demás elementos que conforman la masa del vidrio y por consiguiente, esto reduce los requerimientos de energía para alcanzar la fusión.

Es decir, para fundir una tonelada de cullet se requiere menos energía que para fundir la misma cantidad de materia prima virgen.

Esta diferencia en la cantidad de energía requerida se ve reflejada en las unidades térmicas por tonelada utilizadas en la fundición.

Vida útil del horno de fundición

El menor requerimiento de energía para llevar a cabo la fusión de la mezcla que contiene cullet se refleja en el menor desgaste que sufre la estructura del horno, por lo que la vida útil del mismo se incrementa.

1.6.2 Cullet foráneo

En los porcentajes mencionados en el apartado 1.6 anterior no se especifica el origen del cullet utilizado; sin embargo, para poder utilizar las grandes cantidades de cullet representadas por dichos porcentajes, es necesario disponer de cullet no generado directamente en el horno al que será alimentado. A este cullet se le conoce como "cullet foráneo".

Volúmenes

Actualmente, la empresa Vidrio Plano de México recibe en promedio 5,000 toneladas mensuales de cullet foráneo.

Este cullet se alimenta al horno de fundición como una fracción del cullet total que se alimenta como parte de la mezcla de materias primas.

Por ejemplo, del 35% del cullet que puede llegar a alimentar al horno cuando se está produciendo vidrio claro, únicamente un 30 a 40% puede ser foráneo.

1.6.3 Especificaciones

Para que sea posible alimentar con cullet foráneo un horno de fundición, deberá cumplir con ciertas especificaciones, ya que para ello tiene que considerarse como una materia prima más.

A continuación, se señalan las especificaciones que Vidrio Plano de México utiliza para otorgar a un lote de cullet la categoría de aprovechable para el proceso.

- Con relación al tamaño, no aceptan secciones menores a 3 mm en su mayor dimensión.

- No existe restricción en cuanto al tamaño máximo de la pedacería, siempre y cuando el equipo actualmente instalado pueda manejarlas.
- En el caso de los contaminantes, se tienen las siguientes especificaciones.

Contaminante	Tamaño de partícula	Partes por tonelada
Cromita	Menor o igual a 0.5 mm	60
	Mayor a 0.5 mm	0
Refractarios	Menor o igual a 2.0 mm	60
	Mayor a 2.0 mm	0
Metales ferrosos	Menor o igual a 2.0 mm	50 gramos
	Mayor a 2.0 mm	0
Aluminio	Menor o igual a 2.0 mm	60
	Mayor a 2.0 mm	0
Metales no ferrosos	Menor o igual a 10.0 mm	100
	Mayor a 10.0 mm	0
Grava	Menor o igual a 20.0 mm	500 gramos
	Mayor a 20.0 mm	0
Carburo de silicio	Menor o igual a 2.0 mm	60
	Mayor a 2.0 mm	0
Materiales orgánicos	Menor o igual a 25.0 mm	500 gramos
	Mayor a 25.0 mm	0

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 2

Defectos ocasionados por contaminantes en el vidrio flotado

2.1 Defectos del vidrio.

En el vidrio como en otros materiales, pueden considerarse como defectos todas aquellas manifestaciones surgidas de manera accidental e indeseable que alteren su naturaleza o vayan en detrimento de sus propiedades.

La transparencia y la fragilidad que constituyen las características más peculiares del vidrio, son también las que resultan más afectadas por tales imperfecciones, ya que casi todos los defectos son causa de una disminución de la transparencia y de un aumento de la fragilidad, por lo que resultan mucho más ostensibles y, por lo tanto, más graves que en otros materiales.

Es obvio advertir que muchas de las irregularidades definidas como defectos deben lógicamente dejar de ser consideradas como tales cuando estén provocadas deliberadamente para conseguir un efecto decorativo o un mejoramiento técnico, como sucede en algunos vidrios desvitrificados. En estos casos, su conocimiento resulta aún más importante, ya que, si cuando se teme su aparición, es necesario conocer sus causas para combatirlas, mucho más profundamente debe dominarse el mecanismo de su formación para poder producirlas controladamente.

En términos generales, los defectos del vidrio pueden considerarse en su mayoría como falta de homogeneidad, bien de naturaleza química, bien de carácter físico.

Las heterogeneidades químicas consisten en discontinuidades de la masa vítrea constituidas por inclusiones sólidas y gaseosas, o por la coexistencia de fases vítreas de diferente composición. Las heterogeneidades físicas son frecuentemente una consecuencia de las anteriores, si bien pueden presentarse también en vidrios químicamente homogéneos por efecto de tratamientos térmicos inadecuados o deformaciones mecánicas posteriores.

Los defectos de homogeneidad química, llamados también de fusión o de masa, suelen aparecer durante la fase de elaboración del vidrio anterior al proceso de moldeo, mientras que los de carácter físico, que se producen a partir de esta etapa, solo se manifiestan en el proceso de acabado.

Inclusiones cristalinas.

Las inclusiones sólidas que aparecen en el vidrio reciben la denominación general de piedras o defectos de vitrificación, cualquiera que sea su procedencia. Esta denominación se refiere tanto a las sustancias que no llegan a digerirse por el vidrio fundido, bien se traten de restos infundidos en la mezcla, de impurezas contenidas en la misma o de gránulos de material refractario, como las especies cristalinas segregadas por desvitrificación local del propio vidrio.

Las piedras no solo constituyen en si mismas uno de los defectos más graves del vidrio, por cuanto afectan de un modo importante a su aspecto, sino también pueden atentar contra sus propiedades mecánicas, ya que alrededor de ellas suele crearse un campo de tensiones internas, posible origen de posteriores fracturas.

Infundidos producidos por impurezas.

Las sustancias aluminosas como el caolín, la silimanita, andalucita, cianita o distena, el corindón y otros minerales pesados, que como impurezas pueden hallarse presentes en la arena, suponen un riesgo grave de formación de inclusiones.

La gran semejanza de estos infundidos con las piedras de refractario hace difícil su identificación y, sobre todo, el establecimiento de su origen. Algunas veces, estas impurezas mantienen sus características mineralógicas originales, pero otras, han sufrido transformaciones mas o menos profundas que pueden dar lugar a la formación de otros compuestos, como por ejemplo mullita^{*}.

Los infundidos de alumina suelen presentarse en forma de granos redondos que se distinguen fácilmente de los de cuarzo por su índice de refracción considerablemente más elevado, por el campo de tensiones mecánicas que se crean en su entorno, y por la formación de nódulos vitreos más viscosos y de más fácil digestión. También el propio cuarzo puede presentarse como impurezas de algunas materias primas, como la caliza, la dolomita y el feldespato. Esta presencia puede ser muy grave desde el punto de vista granulométrico si su tamaño excede de 0.8 a 1.00 mm.

Causas de la formación de infundidos y su prevención.

La causa principal de la formación de infundidos es el empleo de materias primas con una granulometría inadecuada. Si los granos de arena son demasiado gruesos, las condiciones de fusión pueden resultar insuficientes para su completa incorporación al vidrio. Por otra parte, el empleo de granos de tamaño muy fino origina aun más infundidos pues reaccionan demasiado aprisa formando prematuramente una masa vitrea heterogénea muy

^{*} Es un constituyente típico de muchas piedras de refractario y aparece normalmente como desvitrificación.

enriquecida en sílice y, por lo tanto, muy viscosa y difícil de homogenizar. También puede suceder, si la mezcla no se halla bien uniformada, o si no posee el grado de humedad adecuado, que los granos finos se segreguen y formen conglomerados de más difícil incorporación. El tamaño óptimo de los granos de arena es el comprendido entre (0.1-0.5mm), dependiendo del tipo de fusión y de la composición del vidrio. En cuanto a la humedad de la mezcla es recomendable mantenerla entre un 2% y un 5%.

Otra causa de la formación de infundidos puede ser una temperatura del horno inferior a la necesaria, o bien una distribución térmica irregular que determine el establecimiento de corrientes de convección que arrastren porciones de la mezcla que no hayan tenido tiempo de disolverse completamente.

Por último hay que citar, como un caso particular, los infundidos que tienen su antecedente en inclusiones sólidas preexistentes en el casco del vidrio agregado a la composición. Su origen anterior puede ser muy diverso (piedras de refractario, desvitrificaciones, o infundidos) lo que puede desorientar al tratar de explicar su presencia.

Piedras de refractario.

De todos los tipos de inclusiones cristalinas que pueden aparecer en el vidrio, el más frecuente es el que tiene su origen en la contaminación producida por el material refractario. Este defecto, que puede considerarse como uno de los más graves, se debe a la progresiva corrosión del material con el que se halla en contacto el vidrio fundido.

Unas veces esta contaminación consiste en pequeños fragmentos o gránulos arrancados del refractario, y en otras, en formaciones cristalinas secundarias surgidas por desvitrificación del vidrio que ha ido enriqueciendo su composición en determinados elementos químicos extraídos del refractario por la acción del disolvente del vidrio fundido, o bien incorporados a éste por goteo o destilación de fases fundidas, procedente de la bóveda o de las paredes del horno.

Piedras negras.

Las llamadas piedras negras constituyen otro tipo bien definido de inclusiones sólidas. Si bien por tener su procedencia en impurezas que acompañan a las materias primas, o en contaminaciones del material refractario, su peculiar aspecto, que las diferencia de todas las piedras, les permite ocupar un lugar propio entre los defectos del vidrio.

Estas inclusiones formadas casi siempre por granos de cromita de hierro ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$), presentan a simple vista un color negro y sólo cuando se observan en espesores delgados, bajo el microscopio, puede apreciarse un oscuro color verde propio de los iones del cromo.

El origen de este defecto hay que buscarlo frecuentemente en los granos de cromita que pueden acompañar a algunas arenas, lo que pone de manifiesto, una vez más, la importancia de llevar un control riguroso de las materias primas. Si el tamaño de estas impurezas no excede de 100 μ m, no producen perturbaciones graves, pues llegan a disolverse en el vidrio fundido.

Un caso particular de este defecto lo constituyen las inclusiones de óxido de cromo que se reconocen fácilmente vistos con el microscopio.

Piedras metálicas.

Las piedras metálicas, lo mismo que las piedras negras, son defectos poco frecuentes y de características muy particulares que permiten su rápida identificación. Debido a su opacidad, cuando se observan al microscopio en luz transmitida, aparecen también de color negro. Están formadas por metales en estado elemental que proceden, bien de impurezas introducidas en la mezcla, o bien de la enérgica reducción de algunos componentes del vidrio. Estas contaminaciones pueden producirse durante el almacenamiento, mezclado o transporte de las materias primas, o con la adición de casco, por entrada accidental de partículas o trozos metálicos de distintas procedencias.

Burbujas formadas por contaminaciones accidentales.

Entre las sustancias que pueden contaminar el vidrio fundido figuran muy frecuentemente pequeños fragmentos metálicos que accidentalmente se introducen junto con la mezcla vitrificable. Por ejemplo, el hierro se convierte inmediatamente en una fuente prácticamente inagotable de burbujas, cuyo contenido está formado predominantemente por CO y CO₂ procedentes de la oxidación de los carburos que acompañan a este metal. Junto a estos gases pueden encontrarse también H₂S y SO₂.

Aparte de por su contenido gaseoso, este tipo de burbujas se caracteriza porque cada una, en su movimiento ocasional, deja tras de sí, a modo de estela, un hilo de color marrón que señala su recorrido.

Además de la incorporación accidental del hierro o de otros metales, el vidrio puede sufrir la contaminación por trozos de plástico, materia orgánica y otras sustancias que al descomponerse o al reaccionar con determinados componentes del vidrio puedan dar origen a burbujas.

2.2 Origen de los contaminantes

Como se vio en el apartado anterior, algunos defectos del vidrio son provocados por la presencia de materiales contaminantes en la materia prima. Particularmente, en el caso del cullet, estos pueden introducirse durante las fases de recolección, embarque o procesamiento.

Dichos contaminantes pueden agruparse en las siguientes categorías.

1. *Metálicos.*

Generalmente los contaminantes metálicos tiene la forma de tapas de recipientes o sellos. Los metales ferrosos característicos incluyen al hierro y al acero. Los contaminantes metálicos no ferrosos incluyen bronce, aluminio, plomo y acero inoxidable.

2. *Orgánicos.*

La contaminación de materiales orgánicos incluye etiquetas de papel y plástico, tapas de plástico, corcho, bolsas de papel, desperdicios de madera, plantas, residuos alimenticios y otros materiales combustibles o degradables.

3. *Cerámicos*

Este tipo de contaminantes constituye una categoría amplia que incluye utensilios de cocina, porcelana, recipientes de vidrio resistentes al calor (Pyrex™, visionware™), vidrio de espejos, vidrio de laboratorio, lámparas de vidrio, vidrio de ventanas, ladrillos, concreto, así como piedras y basura.

A continuación se muestran los requerimientos de cullet con respecto a los contaminantes para algunas industrias del vidrio:

Fabricación de recipientes de vidrio: requiere lotes de cullet sin materiales cerámicos gruesos.

Fabricación de material aislante de fibra de vidrio: requiere cullet sin materiales cerámicos gruesos ni metales (ferrosos o no ferrosos). Generalmente, los contaminantes cerámicos mayores de malla No. 12 no se funden en el horno, por lo que pueden producir inclusiones cerámicas en el vidrio terminado, los recipientes y fibras obstructivas en el equipo. Los metales ferrosos y no ferrosos se funden pero no se disuelven y pueden provocar daños por corrosión en el horno y en el equipo de formado del vidrio.

Demasiado material orgánico en el cullet puede afectar el estado de la oxidación de la mezcla, requiriendo modificaciones en el control de la temperatura.

El cullet para el vidrio-asfalto utilizado para complementar los agregados naturales del asfalto no debe contener materiales orgánicos antes de la mezcla. La degradación de estos materiales orgánicos puede producir problemas de olor y de asentamiento del vidrio-asfalto.

Cemento Portland: cuando se utiliza como agregado del Cemento Portland no estructural, el cullet debe estar limpio de todo residuo orgánico, especialmente azúcar, si ésta se mezcla con el cemento produce un aumento del tiempo de fraguado y un decremento de la resistencia del concreto.

Medio filtrante para caudales pequeños de agua: el cullet no debe contener material orgánico, el cual puede provocar una turbiedad excesiva del efluente. Algunos metales ferrosos y no ferrosos (por ejemplo, el plomo) pueden reducir la calidad del efluente.

Construcción: las aplicaciones relacionadas con la construcción pueden incluir rellenos de materiales en general (carreteras, suelos, etc.). El cullet utilizado para estas aplicaciones, por lo general no debe tener más de 5 a 10% de residuos, determinados mediante inspección visual ya que la degradación de estos materiales orgánicos puede provocar problemas de asentamiento en los rellenos.

Capítulo 3

Métodos existentes para la separación de los materiales contaminantes del cullet

En este capítulo se hará una presentación de los métodos existentes a la fecha para la separación de los diferentes contaminantes del cullet señalados en el capítulo anterior, con la finalidad de seleccionar posteriormente los más adecuados para alcanzar el objetivo del presente trabajo.

Para cada uno de los métodos investigados, se obtuvo información sobre sus principales características, principios de operación, aplicaciones existentes, disponibilidad comercial y limitantes.

3.1 Separación de metales ferrosos

Una de las herramientas que actualmente se emplea para el control y manejo de residuos en cuanto a metales ferrosos, es el llamado método magnético (separación por imanes permanentes o electroimanes), que incluye cualquier actividad que reduzca la carga de residuos metálicos ferrosos que se encuentren presentes en desperdicios industriales potencialmente reciclables.

Cada vez es más extendido el uso de imanes permanentes y electroimanes, tanto para limpieza manual como automática, en lugares clave de las instalaciones industriales, ya que constituyen una solución práctica y eficaz para la separación de residuos de metales ferrosos, facilitando el trabajo en las industrias de proceso continuo y sobre todo, contribuyendo a la mejora de la calidad de los productos obtenidos.

Se trata de sistemas totalmente automáticos de depuración de metales magnéticos, que no ocasionan paradas en el funcionamiento de la planta.

3.1.1 Principio de operación

Para poder entender mejor el funcionamiento de una máquina para separar metales ferrosos mediante el uso de un imán permanente o electroimán, es necesario entender el origen de un imán, que puede explicarse de la siguiente forma:

Se define un imán como el objeto que puede producir un campo magnético exterior y atraer al hierro.

Todos los imanes tienen un polo Norte y un polo Sur que se pueden identificar con una simple brújula. Teniendo en cuenta que la aguja de la brújula apunta hacia el polo norte magnético de la Tierra, cuando acercamos un imán permanente a un brújula, la aguja apuntará hacia el polo Norte del imán permanente.

Alternativamente, se puede identificar la polaridad de un imán permanente, suspendiéndolo de un hilo fino, de forma que pueda girar libremente, y por tanto, orientarse según el campo magnético terrestre, sólo se debe tener en cuenta que el polo norte atrae al polo Sur y repele al polo Norte; el polo Sur atrae al polo Norte y repele al polo Sur, es decir, los polos opuestos se atraen y los iguales se repelen.

3.1.2 Tipos de imanes

Imanes permanentes

Un imán permanente se define como aquel que mantiene su magnetismo después de haber sido magnetizado. Como se señala a continuación, existen varios materiales utilizados para la fabricación de los imanes permanentes:

ALNICO.- Se fabrican por fusión/sinterización y están compuestos por un 8% de aluminio, un 14% de níquel, un 24% de cobalto, un 51% de hierro y un 3% de cobre. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas, aunque son susceptibles de desmagnetización. Tienen la ventaja de tener un buen precio, aunque no tienen mucha fuerza.

Ferrita.- Fabricados con bario y estroncio. Están compuestos de aproximadamente un 80 % de óxido de hierro y de un 20% de óxido de estroncio (óxidos cerámicos). Son resistentes a muchas sustancias químicas disolventes y ácidos. Pueden trabajar a temperaturas de -40°C a 260°C . Las materias primas son de fácil adquisición y de bajo costo. Son resistentes a muchas sustancias químicas, como por ejemplo disolventes, lejías, y ácidos débiles.

Tierras Raras.- Son metálicos, con una fuerza 6 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales; las temperaturas de trabajo varían según el material. En el caso del neodimio, su temperatura de trabajo va de los 90°C hasta los 150°C , en el caso del samario-cobalto pueden llegar hasta 350°C . La utilización de estos imanes está condicionada por la temperatura. Para evitar problemas de oxidación en los de neodimio, se recubren según las necesidades; los imanes de samario no presentan problemas de oxidación.

Electroimanes

Los electroimanes son aquellos dispositivos eléctricos que utilizan la corriente eléctrica para generar un campo magnético, generalmente se construyen enrollando alambre metálico alrededor de un núcleo de hierro o de acero, también puede emplearse níquel y cobalto; pueden refrigerarse con aire y autolimpiarse. Generalmente estos imanes se encuentran suspendidos sobre el material a limpiar y están diseñados para remover o atraer el acero ferroso y otros materiales magnéticos de la carga a reciclar o a limpiar.

3.1.3 Equipos disponibles comercialmente

Los equipos de separación magnética de metales ferrosos tienen las siguientes características:

Sencillez:

Su utilización y manejo no requieren de ningún tipo de especialización y su manejo es prácticamente intuitivo.

Confiable:

Están diseñados para trabajar sin atención de ningún tipo, a la intemperie y en las condiciones adversas de los entornos industriales.

Robustez:

Están contruidos en sólidas cajas completamente aisladas, protección que los hace adecuados para trabajar en el exterior sin problemas de humedad ni de temperatura ambiente.

Economía:

En el caso de los imanes permanentes, el consumo de energía es nulo y en el caso de los electroimanes es mínimo. En ambos casos, el costo de mantenimiento es mínimo.

Actualmente, a nivel comercial se pueden encontrar los siguientes dispositivos para remover materiales ferrosos:

- *"Imán tipo cajón"* (Figura 3.1): Su principal característica es la ausencia de conexión a la red de alimentación eléctrica. En su interior se alojan imanes permanentes cuya imantación está garantizada de por vida, requieren de mantenimiento mínimo, se instalan suspendidos sobre banda transportadora, paralelos a la misma y manteniendo una distancia sobre ella, de acuerdo con sus características.



Figura 3.1 Imán tipo cajón permanente

- "Placas magnéticas" (Figuras 3.2 a y b): Las placas se colocan en conductos, canales, rampas o caídas de materiales no abrasivos. El material, al pasar rozando la cara activa o magnetizada de la placa, deposita en ella las partículas metálicas, las cuales quedan firmemente adheridas. Se fabrican en diversas medidas y potencias.

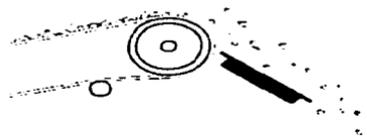


Figura 3.2.a Placa instalada al final de una banda transportadora



Figura 3.2.b Forma real de una placa magnética

- "Overbands" (Figura 3.3): Consisten en un imán permanente o un electroimán rodeado por una cinta extractora que se encarga de eliminar las piezas captadas por el dispositivo magnético, manteniéndolo limpio y en las mejores condiciones de trabajo. La cinta extractora está accionada por un grupo motor de la potencia adecuada y el conjunto se coloca sobre la banda en posición transversal o longitudinal según las condiciones de la instalación y el tipo de trabajo a realizar.

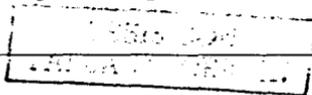




Figura 3.3 Imán con banda transportadora "Overband"

- "Tambores magnéticos" (Figura 3.4 a y b): Son dispositivos magnéticos formados por imanes permanentes que adoptan la forma y tamaño de los tambores guía de las bandas transportadoras. Se fabrican sobre medida, según las necesidades de cada instalación y de acuerdo con la potencia necesaria a transmitir.

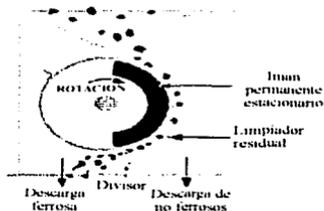


Figura 3.4.a Tambor magnético (fotografía y esquema de funcionamiento)

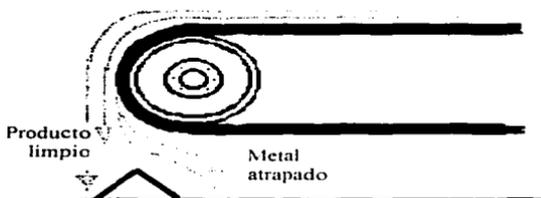


Figura 3.4.b Aplicación de un tambor magnético

- **"Rejas magnéticas"** (Figura 3.5): Son dispositivos de depuración constituidos por grupos de imanes permanentes en calidad ferrita o neodimio, alojados en el interior de tubos de acero inoxidable diamagnético y dispuestos paralelamente, formando una reja por donde debe pasar el material a depurar.



Figura 3.5 Rejas magnéticas

- **"Desferrizadores electromagnéticos"** (Figura 3.6.a y b): Estos se utilizan cuando la distancia de colocación del imán tiene que ser superior a 200 mm o cuando se trata de granulometrías elevadas. Una gran ventaja es la posibilidad de cortar la corriente de alimentación para retirar los hierros captados por el dispositivo. Se construye en diez medidas estándar y existe la posibilidad de realizar fabricaciones especiales a la medida de las necesidades del cliente.



Figura 3.6.a Desterrizador electromagnético



Figura 3.6.b Desterrizadores electromagnéticos

- "Separadores magnéticos de canal inclinado" (Figura 3.7): Son ideales para extraer metal ferroso de los volúmenes de producto seco que fluyen verticalmente a través de un canal inclinado. Cada unidad utiliza dos imanes permanentes de gran alcance, un montaje de tipo cajón en cubierta y un desviador del flujo de producto. Los dos imanes se montan en lados opuestos del cajón.

El desviador del flujo de producto se monta sobre y a lo largo de la línea central del cajón de manera paralela a los dos imanes, el flujo de producto continua hacia abajo del canal inclinado, después se vuelve a dirigir por el desviador de flujo hacia las superficies de contacto de los imanes de cualquier lado del cajón. El alcance magnético de los imanes extrae el metal ferroso del producto y lo sostiene contra los lados del cajón. Cuando requiere limpieza, se abre y se saca el cajón.

Este dispositivo es uno de los más usados en diversas industrias como las de granos, productos químicos, energía, farmacéutica, alimenticia y de resinas, los separadores magnéticos de canal inclinado ofrecen flexibilidad y conveniencia. Existen mecanismos de transición en gran variedad de tamaños para conectar fácilmente con los canales

inclinados. Cada unidad utiliza sellos en las puertas para mantenerlas en su lugar con dispositivos de fijación fáciles de utilizar.

Estas características ayudan a asegurar la eliminación del polvo residual y un ambiente más sano de trabajo.



Figura 3.7 Separadores magnéticos de canal

• *“Unidades magnéticas de tipo cajón en cubierta”* (Figura 3.8): Utilizan dos o más niveles de rejillas magnéticas compensadas para volver a dirigir el producto mientras éste atraviesa la cubierta. El cambio de dirección del producto lo hace retrasar el flujo a través de las rejillas magnéticas, con lo que aumenta la cantidad de metal de desperdicio expuesto a los imanes del tubo y así la separación del flujo del producto se maximiza. La cubierta está disponible en una variedad de tamaños para una conexión fácil a los tubos o a los canales inclinados en línea.

Los materiales magnéticos usados para los imanes del tubo incluyen cerámica, aleación de acero y de neodimio; estas opciones permiten nivelar el tirón magnético apropiado a su uso específico para asegurar el retiro del metal de desperdicio y la protección de la maquinaria de proceso en sentido descendente.

Estas características combinadas aseguran la eliminación del polvo residual y un ambiente más sano del trabajo. Además, las puertas, en los modelos de la industria del plástico, se hacen con un panel transparente de policarbonato para una fácil inspección visual de las rejillas magnéticas.

Cuando es necesario retirar el metal extraído por los imanes, simplemente se abre la puerta y se sacan los cajones para dar un fácil mantenimiento y acceso de los tubos.

Figura 3.8 "Unidades magnéticas de tipo cajón en cubierta"



Una vez que se conocen los dispositivos disponibles comercialmente, se está en posibilidad de seleccionar el que mejor convenga a las características del proceso de limpieza del cullet. En la Tabla 3.1, se muestran de manera resumida las características de cada uno de los dispositivos comerciales encontrados.

	<i>Iman tipo cajón</i>	<i>Placas magnéticas</i>	<i>Overbands</i>	<i>Tambores magnéticos</i>	<i>Rejas magnéticas</i>	<i>Separadores magnéticos de canal inclinado</i>	<i>Unidades magnéticas del tipo de cajón en cubierta</i>
<i>Tipo de imán que utiliza</i>	Permanente o electroman	Permanente	Electroman	Permanente	Permanente	Permanente	Permanente
<i>Costo</i>	Economico	Economico	Caro	Economico	Economico	Caro	Caro
<i>Tiempo de vida</i>	Hasta 15 años	Hasta 5 años	Hasta 10 años	Hasta 5 años	Hasta 5 años	Hasta 10 años	Hasta 10 años
<i>Cantidad de material que maneja</i>	De acuerdo a la potencia	De acuerdo a la potencia	De acuerdo a la potencia	De acuerdo a la potencia	De acuerdo a la potencia	De acuerdo a la potencia	De acuerdo a la potencia
<i>Tamaño de material ferroso a eliminar</i>	Pulverizado o granulado	Pulverizado o granulado	Pulverizado o granulado	Pulverizado o granulado	Pulverizado o granulado	Pulverizado o granulado	Pulverizado o granulado
<i>Límite en cuanto a manejo de materiales</i>	Ninguno	No maneja materiales abrasivos	Ninguno	Ninguno	No maneja materiales abrasivos	Ninguno	Ninguno
<i>Tipo de limpieza</i>	Manual	Manual	Automatica	Manual	Manual	Manual	Manual

Tabla 3.1 Características de los equipos de separación magnética

3.2 Separación de metales no ferrosos

Los metales no ferrosos presentes en el cullet y los cuales es preciso separar del mismo son principalmente: plomo, aluminio, cobre, estaño, y ciertas aleaciones de acero inoxidable. Las técnicas existentes para separar, clasificar o identificar propiedades en estos materiales se originan en el laboratorio, como *ensayos no destructivos*, y en las técnicas aplicadas en la industria extractiva y en la del reciclaje de chatarra de la industria automotriz: a continuación se describen los métodos más utilizados en la industria.

3.2.1 Separación por análisis químico

Este es el método de referencia, consiste del análisis químico por cualquiera de las técnicas disponibles en el laboratorio de acuerdo a los requisitos del material. Siempre será más caro, pero más preciso que cualquiera de los otros métodos.

3.2.2 Separación por corrientes de Eddy

El material a analizar se coloca en el campo magnético variante de una bobina o de un arreglo de conductores alimentados por una corriente alterna (c. a.). El campo magnético de la corriente alterna induce corrientes de Eddy en el objeto a ensayar, estas corrientes de eddy, producen un campo magnético adicional en la vecindad del objeto. La Figura 3.9 ilustra la condición de una bobina colocada en la superficie de un objeto de ensayo. El vector H_p representa el campo magnético primario de la bobina de ensayo, mientras que H_s indica el campo secundario resultante de las corrientes de Eddy en el objeto.

El resultado final es que los dos campos magnéticos se superponen y el campo magnético cerca del conductor de ensayo se modifica; actualmente existen disponibles instrumentos con los cuales se pueden evaluar estos efectos. Este método puede utilizarse para identificar un amplio espectro de características: tales como estructura metalúrgica, condiciones superficiales, tratamientos térmicos, etc., esto se logra porque existen ciertas relaciones lineales o proporcionales entre las propiedades electromagnéticas y físicas de los materiales.

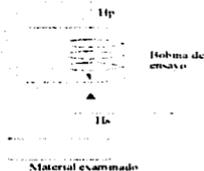


Figura 3.9 Campos magnéticos que interactúan con la corriente de Eddy.

El ensayo por corrientes de Eddy se distingue de otros métodos de ensayos no destructivos por su alta velocidad de realización, lo cual conduce a la automatización del proceso. A continuación se mencionan varias aplicaciones:

- Se utiliza para clasificar y separar materiales o elementos terminados de acuerdo a su dureza en industrias tan diversas como la fabricación de brocas y rollos.
- Se utiliza en el reciclaje de chatarra automotriz.
- La compañía Maltha Glass Recycling en Holanda, opera una planta de reciclaje de cullet de vidrio de botella, la etapa de separación de metales no ferrosos es realizada mediante la técnica de corrientes de eddy.

3.2.3 Separación mediante ensayo por chispas o destellos

Es posible segregar una cantidad de materiales con sólo examinar las chispas o destellos producidos. Esto se basa en el hecho de que cuando se calienta cualquier material por encima de cierto nivel producirá una onda luminosa, o una serie de ellas, que serán idénticas entre sí. Además de separar materiales tales como tungsteno y aluminio del acero, es posible diferenciar entre aleaciones similares.

Existen varios instrumentos en el mercado que son razonablemente portátiles, tales como "Fuess", "Steelscope", y el "Metascope". Con estos se produce una descarga eléctrica entre un electrodo y el metal a separar. Las ondas de luz del destello son divididas por una serie de prismas y entonces es posible examinarlas con un instrumento óptico (ocular). Estas máquinas bien calibradas pueden indicar claramente las ondas de luz presentes, y a partir de ello identificar positivamente la presencia de un elemento en la aleación. Con habilidad y experiencia, es más que posible, a partir de la intensidad de la luz, juzgar la cantidad presente de ese elemento. Las máquinas más sofisticadas fotografían la salida, y

así identifican permanentemente el material. Mientras que estos instrumentos pueden ser usados para dar un análisis aproximado de la composición de los metales, son más útiles en la separación de metales: aquí, con un mínimo de habilidad, se puede hacer el examen de un gran número de barras o componentes, usando como base de comparación un análisis conocido.

3.2.4 Separación por el efecto pirómetro

Cuando se unen dos metales diferentes y se calienta la unión, se produce una corriente eléctrica. Esta corriente eléctrica depende de los metales usados y es una función de la temperatura. Cuando se tienen dos metales conocidos a cierta temperatura, se produce una corriente eléctrica específica para este par de elementos metálicos. Este principio es el que se utiliza para medir la temperatura. Cuando se usa este proceso para separar metales, se calienta a una temperatura controlada con precisión la probeta de un metal usado como referencia, esta probeta se pone en contacto con el metal a examinar, de esta forma se obtiene una lectura en el instrumento de medición, la cual debe registrarse; después, la probeta se pone en contacto con una pieza del metal conocido. Si tienen presentes los mismos elementos metálicos, entonces por el efecto pirómetro se deducirá que los materiales comparados son iguales si se obtiene la misma lectura.

Se debe cuidar que la superficie de contacto de la probeta y del metal a examinar se mantengan limpias. Esta técnica no requiere que los materiales tengan las mismas condiciones metalúrgicas o que la masa del metal sea similar. Una máquina comercial para la realización de esta prueba es conocida como el "Metal Monitor".

3.2.5 Separación por medio de excitación láser

El proceso se basa en el uso de la espectroscopia (el uso de la absorción, emisión o dispersión de la radiación electromagnética emitida por las sustancias, para estudiar cualitativa o cuantitativamente la materia o procesos físicos) de emisiones atómicas inducidas por láser para identificar las partículas de chatarra y separarla con sistemas adecuados en sus fracciones más importantes como Al, Zn y aleaciones de Cu, acero inoxidable y plomo.

En 1990 se introdujo por primera vez en Alemania un sistema mecánico para la clasificación y selección de chatarra triturada proveniente de automóviles utilizando un analizador-detector con excitación láser (ver Figura 3.10). La máquina de separación consta de tres componentes principales: un mecanismo de dosificación, el láser y la unidad detectora, y el sistema de clasificación.

La luz del plasma inducida en la superficie de metal se enfoca hacia fibras ópticas que están acopladas en tres pequeños espectrógrafos, cada uno para un rango del espectro. Mediante policromatógrafos, fibras ópticas adicionales y fotomultiplicadores, el espectro se procesa para obtener la información analítica deseada.



Figura 3.10 Esquema del analizador-detector por excitación láser

Otras aplicaciones son:

- Alcan Inc. Corporación canadiense con valor de \$13,000 millones de dólares que opera muchos aspectos del aluminio y el embalaje, desarrolló en 1995 un sistema de análisis de aleaciones de aluminio para su área de reciclaje.
- La Universidad Tecnológica de Delf en Holanda, analizó en 1995 la factibilidad de este sistema para la selección de chatarra de aluminio, obteniendo resultados satisfactorios.

3.3 Separación de materiales orgánicos

Los materiales orgánicos presentes en el cullet y los cuales es preciso separar del mismo son: plástico, corcho, papel, madera y otros. Los métodos existentes para separar, clasificar o eliminar estos materiales son: corrientes de aire, incineración o mediante mallas separadoras.

El principio de funcionamiento de estos métodos está determinado por las propiedades de los materiales a eliminar o a separar del cullet, principalmente la densidad, la cual se muestra en la Tabla 3.3 para este tipo de contaminantes.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Material	Densidad (kg/dm ³)
Plástico	0.95
Corcho	0.2-0.3
Madera	0.5-0.8
Papel	0.7-1.1
Vidrio plano	2.5

Tabla 3.3 Densidad de los contaminantes del cullet

En la industria existen varios métodos comerciales para la separación de contaminantes orgánicos, los cuales se mencionan a continuación con fines específicos para la selección de nuestro equipo más adelante.

Entre los principales equipos encontrados se tienen los siguientes:

1. Separadores de gravitación a presión.
2. Despedregadores
 - a) Despedregadores a presión.
 - b) Despedregadores al vacío.
3. Mallas separadoras a base de inercia.
4. Incineración.

3.3.1 Separadores de gravitación a presión

El principio por el cual opera este separador, es por medio de tres elementos importantes: corrientes de aire, velocidad de vibración y presión

El sistema de vibración hace que se distribuyan uniformemente los materiales a través de una banda transportadora, lo que permite que se tenga una mejor aspiración del material a separar. El control de la barrera de aire y una sub-plataforma reguladora garantizan la correcta separación del producto, resultando una mejor separación del producto y mayores capacidades.

En este caso, se encontró el separador de gravitación a presión de la Marca Forsberg, modelo 220-P (Figuras 3.11 y 3.12).

Este tipo de separador cuenta con un elevador opcional de reciclaje para permitir que las cargas ligeras y medianas se puedan reciclar y regresar a la plataforma.

A continuación, se señalan las características de dicho equipo:

- Montaje de manejo externo.
- Construcción durable.
- Manejo balanceado, no convencional, para operación silenciosa, sin vibraciones.
- Doble ventilador interior para un control más exacto del aire y óptima ejecución.
- Requisitos mínimos de potencia 7-1/2 HP para granos pequeños; y 10 HP para productos grandes y más pesados.
- Fácil remoción o cambio de la plataforma de limpieza.
- Gran capacidad.

Dimensiones	
Largo	269.24 cm
Ancho	211.77 cm (sin filtro)
Alto	195.58 cm
Peso	2131.92 kg
Area de la plataforma	29.9 pies cuadrados

Tabla 3.4 Dimensiones del separador de gravitación a presión Mod. 220-P



Figura 3.11 Vista posterior Mod. 220-P Figura 3.12 Vista anterior Mod. 220-P

3.3.2 Separación mediante despedregadores

El separador de rocas (des-rocador) funciona bajo el principio básico de dejar fluir el material granulado seco sobre un vibrador, una malla que actúa como plataforma cubierta e inclinada. El aire se dispersa sobre el producto en la plataforma donde comienza el proceso de separación.

La corriente continua de aire sostiene al producto más liviano en estratificación mientras baja por la plataforma vibratoria inclinada. El material más pesado, tal como rocas o

vidrio, viaja hacia arriba y es expulsada hacia fuera. El producto entonces se envía directamente hacia el final de la plataforma, donde se descarga y no necesita de mayor refinamiento.

Los des-rocadores se conocen por su rapidez de separación y forma exhaustiva de trabajo en la separación de materiales extraños de gran tamaño. Actualmente se encuentran trabajando en el campo de los cereales, trigo y minerales.

Equipos comerciales conocidos como despedregadores.

En este caso, se encontraron los modelos de la Marca Forsberg que se señalan a continuación.

Despedregadores Serie P (Figura 13).

Este tipo de despedregadores separa material seco granulado en dos partes específicas dependientes del tamaño. Esto se hace por medio de un movimiento no convencional de la plataforma a altas velocidades, dejando salir el aire a través de una malla de precisión.

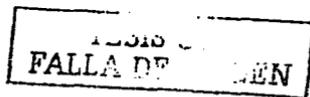


Figura 3.13 Despedregador Marca Forsberg Serie P

a) Despedregador a presión.

Este separador cuenta con una plataforma abierta y un ventilador colocado dentro de la caja creando una presión positiva de aire hacia arriba a través de la plataforma vibratoria con la malla, haciendo que los materiales más livianos viajen hacia la parte inferior de la plataforma y los más pesados hacia la parte superior.

b) Despedregador al vacío.

Este separador cuenta con una plataforma abierta y un ventilador montado afuera de la máquina creando una "succión" de aire hacia arriba a través de la plataforma vibratoria

con la malla, haciendo que los materiales más livianos se mantengan en la zona de estratificación más alta y así viajen hacia la parte baja de la plataforma vibratoria y los más pesados viajen por la plataforma, pero en forma ascendente.

Despedregadores marca Forsberg, Serie G

Existen cuatro tamaños disponibles de despedregadores a presión, con varias configuraciones de la plataforma y numerosas opciones, como el de la Serie G mostrado en las Figuras 3.14 y 3.15.



Figura 3.14 Diagrama esquemático Serie G



Figura 3.15 Despedregador Serie G de la marca Forsberg

3.3.3 Mallas separadoras a base de inercia

La malla separadora a base de inercia está diseñada para proveer una remoción máxima de material fino sobrepuesto con un movimiento alternativo de la malla. Este movimiento asegura un constante contacto del producto con la superficie de la malla y por consecuencia asegura una máxima exposición a la abertura de la misma.

Las características de este tipo de equipo son las siguientes:

Autobalanceo.

- Sistema de amortiguación.
- Movimiento alternativo en línea recta para mayor eficiencia.
- Mallas autolimpiadoras.
- Rápido cambio de las mallas.
- Disponible con nivel de alimentación construido en acero inoxidable.
- Mantenimiento mínimo.

Separadores de doble malla.

De este tipo, se encontró la serie 4800 de dos mallas de la marca Forsberg (Figuras 3.16 y 3.17) cuyas características son las siguientes:

- Avanzado sistema de balanceo.
- Fácil remoción de la malla.
- Tolva almacenadora.
- Construcción opcional en acero inoxidable.

La malla separadora es una rápida malla vibratoria que asegura precisión, alta capacidad y una alta calidad de separación.

Tamaño de la malla	Caballos de fuerza.
45.72 x 121.92 cm	2
82.36 x 121.92 cm	2
116.84 x 121.92 cm	2
152.4 x 121.92 cm	2

Tabla 3.5 Tamaños disponibles de las mallas separadoras



Figura 3.16 Equipo de doble malla separadora de la serie 4800 de Forsberg



Figura 3.17 Equipo de doble malla separadora de la serie 4800 de Forsberg (funcionamiento)

Malla separadora 8400 de la marca Forsberg.

Esta malla separadora es del tipo de cuatro rodamientos, como se muestra en la Figura 3.18

Características:

Los rodamientos exteriores montados de forma independiente, combinados con el sistema de balanceo, eliminan la vibración del marco.

El soporte de la rejilla de la malla no requiere sujetadores, lo que permite retirar cada rejilla con facilidad.

Tiene incorporado un compartimento para bolas dentro del soporte de la rejilla para agregar bolas limpiadoras si fuera necesario.

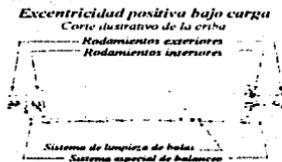


Figura 3.18 Malla separadora de cuatro rodamientos

3.3.4 Incineración.

Uno de los métodos a utilizar para separar los materiales orgánicos del cullet es el de la incineración, el cual consiste principalmente en la calcinación de cualquier material y su conversión a cenizas en función de sus temperaturas de fusión, esto se efectúa mediante la aplicación de calor a dicho material.

Esto puede llevarse a cabo mediante sistemas o cámaras de incineración, los cuales están constituidos por una cámara de combustión donde los materiales orgánicos contenidos en el cullet pasan a través de una plataforma en donde son incinerados por unos quemadores repartidos a todo lo largo de la cámara en unas parrillas especiales para lograr una combustión completa, también cuentan con un horno compuesto por una zona de secado, combustión y extinción, y por último la eliminación de cenizas, las cuales se retiran por medio de un sistema de raspado o extracción.

Los sistemas de incineración, como el mostrado en la Figura 3.19, son un buen método para la eliminación de materiales orgánicos del cullet, pero se deben de tomar en cuenta características de capacidad, eficiencia, control de contaminación de aire, confiabilidad y costos. Los incineradores de este tipo tienen una gran eficiencia, pero el costo de mantenimiento es excesivo.



Figura 3.19 Incinerador de materiales orgánicos

A lo largo de la investigación, se detectó un proceso existente en el Reino Unido para separar materiales orgánicos, el cual se describe a continuación.

El material pasa por un tambor magnético y ya libre de metales ferrosos sigue otras etapas de separación, que consisten en cribas vibratorias de aire, donde se descartan los materiales ligeros que pueden pudrirse.

El producto pasa por una corriente de agua en un separador de corriente ascendente. Los materiales más ligeros flotan; en esta fracción se encuentran los materiales que pudieran pudrirse, como madera, hule y ceniza; en tanto que la fracción que se hunde contiene principalmente vidrio y metales no ferrosos.

Esta fracción se envía a una clasificación óptica, en la que por lo general existen tres etapas de clasificación por las que pasa el material en elevadores espirales.

La limpieza y la transparencia del vidrio después de la corriente de agua es buena, pero algunos contaminantes tienden a oscurecer la superficie del mismo. Por esto se instaló un lavador que se usa después de la primera etapa de clasificación óptica.

La máquina es una unidad de seis canales que está diseñada para trabajar con material moderadamente húmedo, para producir en la primera etapa de separación material transparente y opaco. El clasificador logra concentrar hasta un promedio de 75 a 80% del vidrio. Este seca y pasa por dos etapas más de clasificación óptica, con tres canales por etapa. El concentrado pasa por una limpieza magnética final antes de tamizarse para quitar los materiales más finos producidos por la fragmentación del vidrio durante su manejo.

Aunque es posible alcanzar la pureza señalada, es preciso realizar una verificación constante, así como conservar condiciones de control extremas, realizadas por personal técnico especializado.

Se implantaron diversas modificaciones para mejorar el flujo de materiales y eficiencias de separación.

3.4 Separación de materiales cerámicos y refractarios

Con la finalidad de determinar el método para separar los materiales cerámicos y refractarios del cullet, incorporados tanto por el manejo del cullet como por las inclusiones del vidrio producido, es necesario tener en mente las características de dichos materiales a fin de utilizarlas como parámetros para efectuar la separación.

No existe una definición general de los refractarios. Esencialmente son materiales de punto de fusión elevado; sin embargo, es un aspecto relativo y el punto de fusión no es el único criterio de utilidad.

La mayor parte de los refractarios son materias cerámicas fabricadas con óxidos de elevado punto de fusión, particularmente SiO_2 , Al_2O_3 y MgO .

Los refractarios se pueden clasificar atendiendo a su composición química, siendo los principales los que contienen sílice: alúmina, magnesita y cromita, juntas o separadas. Todos los refractarios dejan residuos al contacto con los materiales que manejan, por lo que la mayoría puede clasificarse más usualmente como *refractarios ácidos* o *refractarios básicos*, e incluso existen los considerados *refractarios neutros*, que son relativamente inertes.

En sentido estricto, el término refractario no es claro, puesto que incluye a materiales denominados "cerámicos" cuyo significado se amplía frecuentemente hasta incluir cualquier sustancia inorgánica no metálica de elevado punto de fusión.

Las principales características de los materiales refractarios están referidas a su capacidad para mantener su integridad durante la operación, generalmente a temperaturas muy elevadas, así como la resistencia al ataque químico de algunas sustancias, propiedades que definen su utilización.

Desafortunadamente, estas características se refieren al comportamiento de estos materiales durante la operación y no se traducen en características físicas externas apreciables que pudieran utilizarse para separarlas de la pedacería de vidrio en un proceso industrial en el que se manejan grandes volúmenes (de miles de toneladas mensuales como en el caso del cullet para la fabricación del vidrio plano), ya que sólo pueden identificarse mediante el análisis químico y pruebas en laboratorio.

Las características físicas que pudieran utilizarse para llevar a cabo una separación de carácter industrial, están relacionadas con las dimensiones, la densidad, el magnetismo y las características eléctricas principalmente.

Para el caso que nos ocupa, se observa lo siguiente:

Dimensiones

Esta es una característica utilizada en muchos procesos de separación, sea que los materiales a separar tengan un tamaño determinado por su propia naturaleza o que se les haya reducido a él, mediante alguna operación mecánica previa de trituración o molienda.

En el caso de los materiales cerámicos y refractarios presentes en el cullet, por lo general se trata de residuos de productos fabricados a partir de dichos materiales: ladrillos y otras formas de recubrimiento refractario, utensilios, etc., por lo que las dimensiones no son de ninguna manera homogéneas, y en caso de ser triturado junto con el cullet que lo contiene, el resultado sería más bien una homogeneización de ambos materiales (cerámicos y refractarios) que haría imposible una diferenciación física por dimensiones.

Densidad

Otra característica utilizada ampliamente en la industria para la separación de materiales es la densidad, aprovechando la diferencia de densidad de los materiales a separar se utilizan medios de suspensión, agua principalmente, para formar diferentes capas que posteriormente se extraen por diferentes métodos.

En el caso del cullet y los materiales cerámicos y refractarios, las densidades son muy similares, en el caso del vidrio, va desde 2 hasta 6 g/cm^3 (aproximadamente 2.5 g/cm^3 en el caso del vidrio plano) y los cerámicos y refractarios desde 0.1 hasta 3.4 g/cm^3 .

Particularmente el carburo de silicio, que es un contaminante importante del cullet, tiene una densidad de 2 g/cm^3 .

La diferencia de densidades señalada en el párrafo anterior no permite utilizar la flotación como método para separar los materiales cerámicos y refractarios del cullet, salvo tal vez por algunos refractarios con una densidad muy baja.

Magnetismo y características eléctricas

Tanto los materiales refractarios y cerámicos, como el vidrio, no tienen características magnéticas apreciables y todos son malos conductores de electricidad (y de calor) y no es posible establecer diferencias claras que nos permitieran separar un material de otro.

No obstante lo anterior, existe una característica que diferencia con claridad los materiales refractarios y cerámicos del vidrio que es la opacidad. La principal característica del vidrio, y la razón por la que fundamentalmente se ha producido desde hace miles de años, es su transparencia y sus altos índices de reflexión de la luz. Los materiales cerámicos y los refractarios son opacos, y sus índices de reflexión de la luz, salvo que tengan una superficie acabada muy pulida, que por lo general no es el caso, y cuando se encuentran dispersos en los volúmenes de cullet, son bajos.

La opacidad podría ser utilizada para separar los materiales refractarios y cerámicos del cullet de vidrio.

3.4.1 Equipo disponible comercialmente

Existen algunos equipos comerciales diseñados con el propósito de separar refractarios y cerámicos específicamente para el caso del cullet. Asimismo, en algunas empresas y universidades en el mundo se están desarrollando sistemas para separar materiales con base en su opacidad e índices de reflexión.

Se considera factible la utilización de luz infrarroja para identificar la opacidad de materiales cerámicos para extraerlos posteriormente mediante chorros de aire. Una vez que se identifican los materiales, se pueden disparar pulsos de corrientes de aire para separarlos físicamente².

En este sentido, se han diseñado algunos equipos para separar partículas de plástico tomando en cuenta sus colores, opacidades y densidades particulares, de materiales en los que se encuentran mezclados, para la industria automotriz, por ejemplo, en la Figura 3.20 se muestra un esquema del principio de separación.

² Separation Technologies for the Industries of the Future (1999) de The National Academy Press, en E. E. U. U. A.



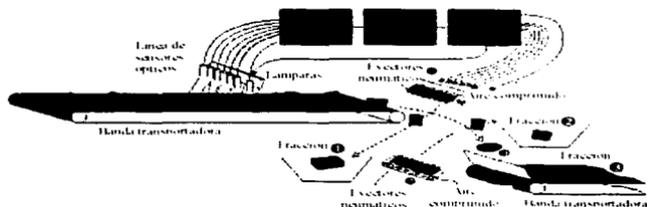


Figura 3.20 Principio de separación del KUSTA 4002M-32

Existe una compañía en Estados Unidos, MSS Inc., que fabrica equipos para separar cullet por color, que también se utiliza para la separación de materiales cerámicos y refractarios aprovechando su opacidad.

Estas máquinas utilizan 3 diodos emisores de luz de diferente longitud de onda (azul, verde y rojo) para identificar los colores de las partículas de vidrio y 1 diodo emisor de luz con longitud de onda cercana al infrarrojo (NIR) en el caso de los materiales opacos, pudiendo identificar partículas de vidrio de 9 a 50 mm de tamaño. Los diodos emisores se complementan con fotodiodos que funcionan como detectores ópticos de alta velocidad.

La señal que se obtiene de los detectores ópticos se procesa digitalmente utilizando un sistema de cómputo de procesadores paralelos y programas específicos que permiten una detección muy precisa aún en partículas gruesas de vidrio, así como "ignorar" el polvo que pudiera cubrir al cullet. Una vez procesadas las señales de los detectores ópticos, se emiten señales de salida que accionan chorros precisos de aire a presión que retiran los materiales cerámicos y refractarios de la corriente de cullet.

Este equipo tiene un bajo costo de mantenimiento ya que tiene muy pocas partes móviles y su tamaño es reducido y de fácil montaje en líneas de limpieza de cullet.

3.5 Separación de finos

De manera adicional, sin que ello implique rigurosamente que se trata de otros contaminantes, en la industria del vidrio plano se considera como indeseable la presencia de finos (partículas pequeñas de materiales) dentro del cullet para reciclado debido a tres causas principales: la pérdida de material que implica su dispersión en el ambiente debido

a su peso reducido, el manejo de este tipo de polvos que se haría necesario con la dispersión y la posible inclusión de contaminantes, principalmente cerámicos y refractarios, que podría provocar la inclusión de estas partículas en los sistemas de detección y extracción, donde sería difícil detectarlas.

Con la finalidad de satisfacer este requerimiento de la industria, se procedió también a identificar los métodos existentes para la separación de este tipo de presentación de los materiales. En este caso, la propiedad física utilizada para la separación es obvia: el tamaño de la partícula.

En este sentido, se considera que los finos pueden retirarse del cullet mediante una operación de lavado. Para el efecto, se procedió a investigar sobre la existencia de algún sistema de lavado de tipo comercial que pudiera cubrir esta función, pero no se encontró ninguno que pudiera satisfacer las necesidades específicas del proceso, precisamente porque todos estos sistemas de lavado se diseñan ex-professo.

Por lo anterior, en la sección correspondiente, se procederá a desarrollar los conceptos para la integración del sistema de lavado de cullet.

Capítulo 4

Selección de equipo

Introducción

En este capítulo se procederá a definir los sistemas funcionales del equipo de limpieza del cullet y posteriormente a seleccionar el equipo adecuado para cada uno de dichos sistemas; en el siguiente capítulo se procederá a diseñar el equipo necesario.

4.1 Definición de los sistemas funcionales

Como se determinó en el capítulo anterior, para retirar los contaminantes del cullet es necesario que el equipo de limpieza realice las siguientes funciones:

- Separación de materiales ferrosos
- Separación de materiales no ferrosos
- Separación de materiales orgánicos
- Separación de materiales cerámicos y refractarios
- Separación de finos

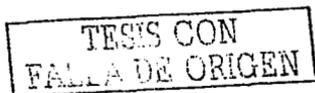
A efecto de integrar el sistema, a continuación se procede a seleccionar el equipo necesario adecuado para la ejecución de cada función, conforme a las especificaciones de cullet limpio de Vidrio Plano de México, que es la única empresa en México que en la actualidad utiliza cullet para la producción de vidrio plano. Estas especificaciones se encuentran señaladas en la Sección 1.6 de este trabajo.

4.2 Selección del método para la separación de metales ferrosos

En este caso, el único método existente es el de la atracción magnética, por lo que se procederá a seleccionar el equipo de entre las diversas opciones existentes de separadores magnéticos.

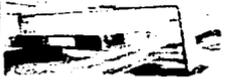
4.2.1 Especificaciones de diseño

En la tabla 4.1 se listan las especificaciones deseadas y requeridas para la selección de los equipos, basándose en los requerimientos de la planta productora de vidrio flotado.



4.2.2 Selección del equipo para separación de metales ferrosos

En la tabla 4.2 se señalan las características técnicas y los modelos de separadores magnéticos disponibles comercialmente.

MODELOS	CARACTERÍSTICAS						
	Maneja	Limpeza	Durabilidad	Costo	Materiales que maneja	Capacidad de manejo de materiales	Tamaño mínimo de pieza metálica a separar
 Iman permanente tipo cajón	Sobre banda transportadora	Manual	Hasta 5 años	\$50,000.00 a \$90,000.00 M N	Todo tipo	De 100 a 400 kg/m ³ , según el tamaño	Pulverizado o granulado
 Electroiman	Sobre banda transportadora	Autopropulsable	Hasta 5 años	\$100,000.00 a \$200,000.00 M N	Todo tipo	De 100 a 400 kg/m ³ , según el tamaño	Pulverizado o granulado
 Placa magnetica permanente	A la descarga o salida del material a separar	Manual	Hasta 5 años	\$40,000.00 a \$60,000.00 M N	No maneja materiales abrasivos	De 100 a 400 kg/m ³ , según el tamaño	Pulverizado o granulado
 Overband	Sobre banda transportadora	Autopropulsable	Hasta 5 años	\$150,000.00 a \$250,000.00 M N	Todo tipo	De 100 a 1000 kg/m ³ , según el tamaño	No debe ser pulverizado ni granulado
 Tambor magnetico permanente	Debajo de banda transportadora o dentro de ducto de descarga	Manual	Hasta 5 años	\$40,000.00 a \$60,000.00 M N	Todo tipo	De 50 a 200 kg/m ³ , según el tamaño	Pulverizado o granulado

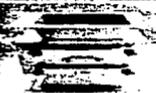
MODELOS	CARACTERÍSTICAS						
	Movimiento	Limpieza	Durabilidad	Costo	Materiales que maneja	Capacidad de manejo de materiales	Tamaño mínimo de pesta metálica a separar
 Rejillas magnéticas permanentes	A la descarga o salida del material a separar	Manual	Hasta 5 años	\$25 000.00 a \$50 000.00 M. N.	Lo maneja materiales abrasivos	De 50 a 200 kg/hr. según el tamaño	No debe ser pulverizado ni granulado
 Imán permanente de canal inclinado	A la descarga o salida del material a separar	Manual	Hasta 5 años	\$100 000.00 a \$200 000.00 M. N.	Todo tipo	De 100 a 1000 kg/hr. según el tamaño	Pulverizado o granulado

Tabla 4.2 Modelos y características de los equipos para separar metales ferrosos

4.2.3 Criterios para seleccionar el equipo

Para seleccionar el equipo más adecuado de acuerdo a las especificaciones mencionadas en la tabla 4.1; se proponen los siguientes criterios a seguir; así como las calificaciones para evaluar cada uno de ellos:

✓ Facilidad de operación

Uno de los parámetros a seguir, mencionado en la tabla 4.1, en cuanto a operación del equipo es que sólo requiera de un operario, por lo que el equipo tiene que ser semiautomático; en este caso, implica un imán permanente. es decir que no sea necesario accionarlo continuamente o suministrarle energía eléctrica para producir el campo magnético. Por lo anterior las calificaciones para evaluar este criterio son las siguientes:

- 3 = No requiere operario
- 2 = Requiere un operario
- 1 = Requiere más de un operario

✓ Fácil mantenimiento

Se refiere a que no se tenga que estar limpiando constantemente o cambiando partes internas del imán que se puedan dañar y además que la instalación del imán no sea de difícil acceso, para facilitar su mantenimiento. Para evaluar este criterio se tienen las siguientes calificaciones.

- 3 = Auto-limpiable y fácil montaje y desmontaje
- 2 = Limpieza manual, fácil montaje y desmontaje
- 1 = Limpieza manual, pero con dificultad de acceso al lugar de instalación y difícil de desmontar.

✓ Volumen ocupado (de acuerdo a la carga a manejar)

No debe ocupar un espacio mayor al requerido por la carga a limpiar de cullet, debido a que el espacio donde se va a confinar no es muy amplio. Además tiene que cumplir con la facilidad para ser ensamblado en conjunto con otros equipos de proceso.

- 3 = El equipo puede acoplarse al proceso y fácil ensamble con otros equipos.
- 2 = El equipo puede ser acoplado al proceso, pero no se puede ensamblar con otros equipos
- 1 = No se acopla al proceso y además no se ensambla con ningún otro equipo

✓ Simplicidad de forma y partes

En este concepto se involucra el tipo de imán que podemos utilizar para simplificar su mantenimiento, instalación y obtención de partes de repuesto o refacciones.

- 3 = Simpleza de forma, fácil adquisición de partes de repuesto.
- 2 = Simpleza de forma, pero difícil adquisición de refacciones.
- 1 = Forma confusa y difícil conseguir refacciones.

✓ Costo

Deberá ser bajo con la finalidad de reducir el costo total del proceso, incluye el costo de mantenimiento y el de refaccionamiento. La mejor opción sería eliminar los costos de refaccionamiento y mantenimiento.

- 3 = Costo entre \$50,000.00 y \$80,000.00 M.N.
- 2 = Costo entre \$81,000.00 y \$120,000.00 M.N.
- 1 = Costo entre \$121,000.00 y \$1,000,000.00 M.N.

✓ Eficiencia en cuanto a funcionalidad

El equipo deberá eliminar el 100% de los metales ferrosos del cullet, aún y cuando se encuentren pulverizados. Además, debe tenerse en cuenta la carga de material a manejar y la cantidad de contaminante a eliminar; es decir todo el cullet a manejar debe quedar

totalmente limpio de metales ferrosos, esto podría comprobarse tomando muestras de cullet por hora en cantidades especificadas por el personal de calidad de la planta productora de vidrio flotado.

- 3 = Separa el 100% de los 50 gramos de metal por tonelada de cullet, ya sea pulverizado o granulado
- 2 = Separa hasta un 80% de los metales ferrosos especificados en los contaminantes.
- 1 = Separa menos del 70% de lo requerido, además que no puede separar el metal pulverizado granulado

✓ Durabilidad

Se refiere a que el equipo tendrá que ser durable hasta el tiempo especificado, tanto por la planta de vidrio flotado como por el proveedor del equipo, con la finalidad de no cambiar con frecuencia este equipo. Es importante recordar que el material a manejar (cullet) es muy abrasivo.

- 3 = Cinco años o más de vida útil.
- 2 = De tres a cinco años de vida útil.
- 1 = Menos de tres años de vida útil.

✓ Confiabilidad

Con este criterio se califica la certidumbre en cuanto a estabilidad de funcionamiento y de seguridad de los equipos, ya que al ser operados por una persona, no debe presentar problemas de inseguridad hacia el personal u operario y no debe parar o entorpecer el proceso de limpieza.

- 3 = Estable y sin ningún riesgo de seguridad.
- 2 = Semi-estable (considerando que tiene partes móviles) y con cierto riesgo de seguridad.
- 1 = Inestable y con alto riesgo de seguridad en su funcionamiento.

Para obtener un resultado más confiable en la matriz de selección (Tabla 4.3 en la siguiente página), se considerará el porcentaje mas alto de la suma de las calificaciones de todos los criterios para cada equipo. Desde luego que se tiene que comparar con el equipo ideal, el cual tiene la calificación más alta en todos los criterios.

En caso de tener varios equipos con un porcentaje elevado, deberán tenerse en cuenta los siguientes puntos para considerarlos como confiables:

- 1.- Se tendrá que definir como se suministrara el cullet a estos equipos.
- 2.- ¿Cuál va a ser el sistema de transporte de cullet?
- 3.- ¿Qué contaminante se va a eliminar en el siguiente proceso?

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

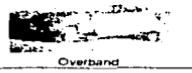
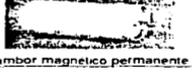
MODELOS	CRITERIOS									
	Facilidad de operación	Facilidad de mantenimiento	Volumen ocupado	Simplicidad de forma y partes	Costo	Eficiencia	Durabilidad	Confiabilidad	TOTAL	Evaluación porcentual con respecto al equipo ideal
 Iman permanente tipo cajón	3	2	3	3	2	3	2	3	21	88%
 Electroiman	2	3	3	2	1	3	3	3	20	83%
 Placa magnetica permanente	3	2	3	3	3	1	1	2	18	75%
 Overband	2	3	1	2	1	1	3	2	15	63%
 Tambor magnetico permanente	3	2	3	3	2	3	3	3	22	92%
 Rejillas magneticas permanentes	3	1	2	3	3	2	1	1	16	67%
 Iman permanente de canal inclinado	3	1	2	2	1	1	3	2	15	63%
IDEAL	3	3	3	3	3	3	3	3	24	100%

Tabla 4.3 Matriz de selección del equipo para separar metales ferrosos

Conforme a las calificaciones asignadas por criterio para cada equipo, se observa que el más adecuado para separar los metales ferrosos de diversos tamaños del cullet, es un imán permanente tipo cajón o un tambor magnético permanente.

4.3 Selección del método para la separación de metales no ferrosos

La separación de los metales no ferrosos implica dos elementos distintos, un analizador o detector de la composición o presencia del metal no ferroso, y un elemento mecánico que realice la separación en sí de este material del flujo de cullet. Al carecer de información cuantitativa, la selección del método más adecuado para la separación de los metales no ferrosos se realizará basada en las cualidades del método analizador-detector que lo hacen apropiado para su aplicación en área del vidrio reciclado, como se muestra en la tabla 4.4.

	<i>Posición del analizador-detector</i>	<i>Velocidad de operación</i>	<i>Disposición comercial</i>	<i>Precisión</i>	<i>Condiciones especiales</i>
Corrientes de eddy	Sin contacto	Alta velocidad	Disponible	Muy precisa	
Chispas ó destellos	Contacto	Depende del operador	Disponible	Depende del operador	Personal entrenado y con experiencia
Efecto pirómetro	Contacto	Lenta	Disponible	Precisa	Superficies de contacto limpias
Técnica láser	Sin contacto	Alta velocidad	Disponible	Muy precisa	Equipo electrónico delicado

Tabla 4.4 Selección del método de separación de metales no ferrosos

La deficiencia de los métodos de chispas y efecto pirómetro para adaptarse a un proceso continuo los hacen poco o nada prácticos para las condiciones requeridas en el tratamiento del cullet.

Después del estudio de la información recopilada, se encuentra que las cualidades que presenta el método de separación por corrientes de eddy; es decir, velocidad, precisión, nivel de automatización y disponibilidad tecnológica y comercial, son más adecuadas para su aplicación en el reciclaje de cullet de vidrio flotado.

4.3.1 Especificaciones del equipo de separación de metales no ferrosos

Una vez seleccionado el método de separación de metales no ferrosos, el equipo basado en ese principio debe satisfacer las especificaciones mostradas en la Tabla 4.5, proporcionadas dadas por Vidrio Plano de México.

Especificaciones	Requerido	Deseado
✓ Propósito Separar los metales no ferrosos del flujo de cullet	X	
✓ Tamaño del cullet manejado Mayor a 10 mm por partícula (mínimo para los equipos disponibles)	X	
✓ Cantidad de metales no ferrosos a la entrada 0.8 kg de metales no ferrosos por tonelada de cullet (Máximo histórico)	X	
✓ Cantidad y tamaño de metales no ferrosos a la salida Aluminio: 60 partes por tonelada de cullet, con tamaño de partícula igual o inferior a 2 mm	X	
✓ Otros metales no ferrosos 100 partes por tonelada de cullet, con tamaño de partícula igual o inferior a 10 mm		X
✓ Capacidad del sistema 5 toneladas de cullet por hora	X	
✓ Tipo de Operación Continua	X	
✓ Energía de accionamiento Eléctrica	X	

Tabla 4.5 Especificaciones de diseño

4.3.2 Descripción de los equipos comerciales para la separación de metales no ferrosos

Después de realizar una investigación exhaustiva, se encontraron los siguientes equipos para la separación de metales no ferrosos, cuyo principio de operación son las corrientes parásitas, o corrientes de eddy.

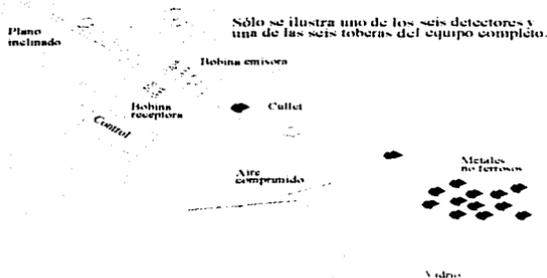


Figura 4.1 . Operación del equipo ELPAC EL-8G

ELPAC EL-8G

Se alimenta una capa delgada de cullet sobre el plano inclinado donde se encuentran colocados en paralelo seis detectores de metales no ferrosos, constituidos por una bobina emisora que trabaja en forma similar a la descrita en el apartado 3.2.2., con la diferencia de que se ha adicionado una bobina receptora. Cuando un material conductor pasa sobre la bobina receptora afecta la señal eléctrica recibida por ésta, las variantes en la señal son analizadas por el sistema de control, el cual, una vez detectada la presencia del material envía una señal para que el sistema de aire a presión lo saque del flujo de cullet. El momento y duración del chorro de aire es controlado con gran precisión para disminuir al máximo la pérdida de vidrio. En las Figuras 4.2 a 4.4 se muestra este equipo.

Características del equipo:

Marca:	MSS
Modelo:	ELPAC EL-8G
Lugar de fabricación:	Nashville Tennessee, USA
Capacidad:	10 ton/hr
Eficiencia de remoción:	98%
Pérdida de cullet:	menos del 2%
Nivel de contaminación:	500 ppm

Requerimientos eléctricos:

Consumo de potencia:

Presión de aire requerida:

Dimensiones:

Volumen ocupado:

Otros datos:

220 VAC, 50/60 Hz

1.0 kW

60 psi / 5 bar

104" x 40" x 118"

2.6 x 1.0 x 3.0 m

7.8 m³

Detecta y separa partículas de hasta 1/100 de gramo tales como películas de aluminio

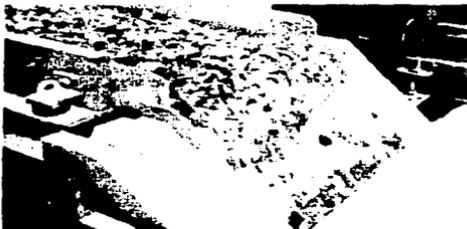


Figura 4.2 ELPAC EL-8G - Plano inclinado



Figura 4.3 ELPAC EL-8G
Toberas de separación



Figura 4.4 ELPAC EL-8G Cubierta exterior

ECS-24" REA Standard

El equipo está formado por los siguientes elementos:

- Una banda transportadora de uretano que gira a una velocidad convencional para estos equipos.
- Un tambor que actúa a la vez como guía de la banda transportadora y cubierta protectora del rotor de imanes permanentes. El tambor está recubierto con materiales compuestos no metálicos con el fin de resistir el efecto abrasivo del vidrio y de permitir el libre paso del flujo magnético producido por el rotor.
- Dentro del tambor y concéntrico a éste gira en sentido contrario un rotor de imanes permanentes de Tierras Raras (Neobidio-Boro-Hierro) a una velocidad de 2500 r.p.m.

Cuando la mezcla de materiales conductores y aislantes (cullet) transportada por la banda pasa sobre el tambor, el flujo magnético variante actúa sobre las partículas conductoras de tal forma que una *fem* inducida y por tanto una corriente parásita es generada en ellas. Ahora, como tales corrientes fluyen en un campo magnético, experimentan una fuerza electromagnética (Fuerza de Lorentz), la cual desvía las partículas conductoras fuera del flujo de cullet

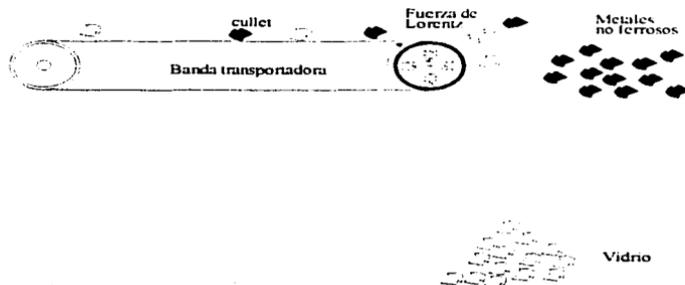


Figura 4.5 Operación del equipo ECS-24" REA Standard

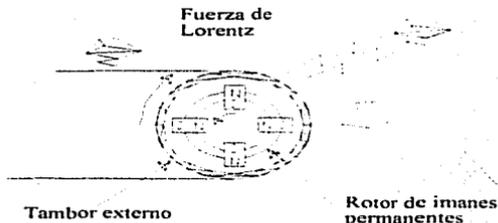


Figura 4.6. ECS-24'' REA Standard - Detalle

Características del equipo:

Marca:	Eriez Magnetics
Modelo:	ECS-24'' REA Standard
Lugar de fabricación:	USA
Capacidad:	5 ton/hr
Producto típico:	1/4'' x 2'', 3/8'' tamaño nominal
Nivel de contaminación:	300 ppm
Ancho de la banda:	24 ''
Dimensiones:	61 cm
	224'' x 76'' x 81''
	5.7 x 1.9 x 2 m
Volumen ocupado:	21.6 m ³
Peso:	3175 kg
Tipo de rotor:	REA High-Frequency 22 polos
	Neobidio-Boro-Hierro
Velocidad del rotor:	2500 r.p.m.
Motor del rotor:	7.5 HP
Motor de la banda:	2.0 HP
Control:	NEMA 4
Material de la banda:	Uretano

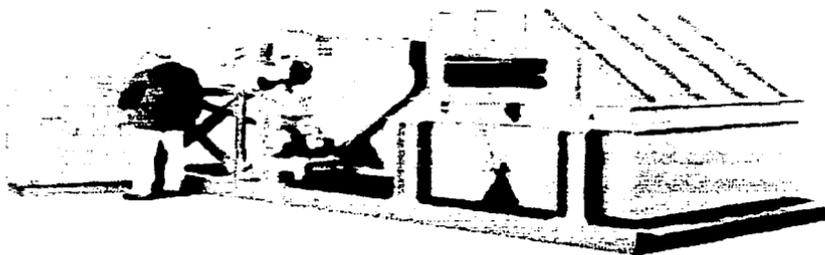


Figura 4.7. REA Standard – Cubierta externa

4.3.3 Criterios de selección para los equipos separadores de metales no ferrosos.

✓ Capacidad

Se refiere a la cantidad de material que es capaz de manejar por hora en una aplicación típica. De acuerdo al nivel de satisfacción de las especificaciones de la Tabla 4.5 se calificarán de la siguiente manera:

- 3 = Entre 5 y 6 ton/hr
- 2 = Más de 6 ton /hr
- 1 = Menos de 5 ton/hr

✓ Nivel de contaminación

Indica la cantidad de metales no ferrosos que componen el flujo de material a la salida del equipo, expresada en ppm (partes por millón)

- 3 = Menos de 500 ppm
- 2 = Entre 500 y 1000 ppm
- 1 = Más de 1000 ppm

✓ Volumen

Se trata del volumen ocupado por el equipo según sus dimensiones máximas, el cual habla de su versatilidad para adaptarse en el nuevo sistema de limpieza del cullet.

- 3 = Menos de 15 m³
- 2 = Entre 15 y 25 m³
- 1 = Más de 25 m³

✓ **Potencia consumida**

Basada en la cifra total dada por el fabricante o por la suma de la potencia de los motores.

- 3 = Menos de 10 kW
- 2 = Entre 10 y 20 kW
- 1 = Más de 20 kW

✓ **Facilidad de operación**

Involucra el grado de automatización, así como el número de operarios y supervisores necesarios para que se realiza la limpieza del cullet sin contratiempos.

- 3 = No requiere ningún operario y la supervisión se realiza a distancia
- 2 = Requiere un operario y/o la supervisión local
- 1 = Requiere más de un operario

Criterio	Calificación por Equipo	
	ELPAC EL-8G	ECS-24" REA Standard
Capacidad	2	3
Nivel de contaminación	2	3
Volumen	3	2
Energía consumida	3	3
Facilidad de operación	3	3
TOTAL	13	14
Porcentaje respecto del ideal	86.7	93.3

Tabla 4.6 Selección del equipo de separación de materiales no ferrosos

Conforme al análisis mostrado en la Tabla 4.6 anterior, el equipo a utilizar para separar metales no ferrosos será el ECS-24" REA Standard.

4.4 Selección de equipo para la separación de materiales orgánicos.

En el Capítulo 3 se mencionaron diferentes métodos para separar materiales orgánicos, fundamentalmente tomando en cuenta la densidad de los materiales a separar y la incineración. Esto da lugar a la selección de equipo comercial existente, el cual se tendrá que seleccionar de acuerdo a las características de operación. En la tabla 4.6 se presentan los modelos comerciales existentes.

Tabla 4.6 Modelos y características de los equipos para separar materiales orgánicos

Criterios para la selección del equipo.

Para seleccionar el equipo se toman en cuenta los siguientes criterios, a cada uno de los cuales se asignará una escala de calificaciones que nos arroje valores finales de selección.

✓ Fácil mantenimiento

Se refiere a que no se tenga que estar limpiando constantemente el equipo o cambiando partes internas de la máquina que se pudieran dañar, además que la instalación del sistema no sea difícil, para facilitar su mantenimiento. Para la evaluación de este criterio, se tienen las siguientes calificaciones.

- 3 = Autolimpiable y fácil montaje y desmontaje
- 2 = Limpieza manual, fácil montaje y desmontaje
- 1 = Limpieza manual, pero con dificultad de acceso al lugar de instalación y de difícil desmontaje.

✓ Durabilidad

Se refiere a que el equipo tendrá que ser durable hasta el tiempo especificado, tanto por la planta de vidrio flotado, como por el proveedor del equipo, con la finalidad de no cambiar con frecuencia este equipo.

- 3 = Cinco años reales, considerando que se maneja un material abrasivo y desgastante para este equipo.
- 2 = Menos de cinco años, hasta tres, considerando material abrasivo.
- 1 = Menos de tres años, considerando que se maneja un material abrasivo.

✓ Funcionamiento en campo

Es el comportamiento de la máquina en modo de operación, o sea si presenta una característica especial, como ruido o vibraciones, las cuales deben ser contempladas para una buena operación y seguridad del operario.

- 3 = Sin ruido y sin vibración
- 2 = Poco ruido, poca vibración
- 1 = Alto ruido, mucha vibración.

✓ Capacidad

Es el volumen requerido por Vidrio Plano para la separación de cullet de material orgánico, el cual se encuentra en el rango de 5 ton/hr, la máquina deberá estar diseñada para dicho volumen.

- 3 = Alta
- 2 = Media
- 1 = Baja

✓ **Tamaño del equipo**

La máquina deberá ocupar el área determinada por Vidrio Plano de México y no excederlo, pues podría ocasionar que otros sistemas no puedan acoplarse en el área establecida.

- 3 = Según requisición
- 2 = Pequeña
- 1 = Robusta

✓ **Tipo de material**

La máquina deberá separar el material orgánico presente en el cullet y deberá estar diseñada para este proceso, o que la unidad tenga la característica de poder adaptarse para hacer la separación sin problemas.

- 3 = Deseado
- 2 = Todo tipo de material
- 1 = No aplica

✓ **Costo**

Deberá ser bajo, con la finalidad de reducir el costo total del proceso, pero también se debe involucrar un bajo costo de mantenimiento, al igual que el de refaccionamiento, la mejor opción sería si no tuviera costos de refaccionamiento y mantenimiento.

- 3 = Costo menor a
- 2 = Costo entre
- 1 = Costo mayor de

✓ **Eficiencia**

El equipo deberá eliminar el 100% de los materiales orgánicos, además deberá tenerse en cuenta la carga de material a manejar y la cantidad de contaminante a eliminar, es decir, el cullet deberá estar limpio de todos los materiales orgánicos. Esto puede llevarse a cabo realizando pruebas de cullet por hora.

- 3 = Separa todo el material orgánico presente en el cullet.
- 2 = Separa entre el 80 y el 99% del material orgánico presente en el cullet.
- 1 = Separa menos del 80% del material orgánico presente en el cullet.

En la tabla 4.7 se muestra la selección del equipo de separación de materiales orgánicos.

De acuerdo con los criterios establecidos en dicha tabla, se puede concluir que el equipo más adecuado para la separación de materiales orgánicos del culter es el Despedregador a presión Serie G de la Marca Forsberg, el cual obtuvo un porcentaje del 85%.

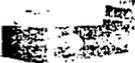
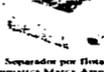
	Facil mantenimiento	Durabilidad	Materia de construcción	Dimensiones (l x a x al) Peso	Eficiencia	Capacidad	Tamaño o tipo de material que maneja	Funcionamiento en campo	Costo	Total	Evaluación
 Separador de granulación a presión Mod. 220 P Marca Forsberg	2	2	1	1	2	3	2	1	3	17	62%
 Despedregadora a presión Serie G Marca Forsberg	3	2	2	2	2	3	3	3	3	23	85%
 Despedregadora al vacío Serie P Marca Forsberg	2	2	2	1	2	3	1	1	3	17	62%
 Ingenieros Marca Ingenua	1	2	2	1	3	3		3	2	17	70%
 Separador por gravedad neumática Marca Arrow Corp.	2	2	2	2	2	3	2	2	2	19	70%
 Separador por filtración neumática Marca Arrow Corp.	1	2	2	2	2	3	2	3	2	19	70%

Tabla 4.7 Matriz de selección de equipo para la separación de materiales orgánicos

4.5 Selección del método para la separación de materiales cerámicos y refractarios

Como se señaló en el capítulo anterior, sólo existe un método comercial para la separación de materiales cerámicos y refractarios del cullet, que de hecho se considera el más conveniente: el método óptico en el que se determina la opacidad de los materiales presentes en el cullet mediante la absorción de diferentes ondas luminicas, ubicándolos dentro del flujo de cullet y ordenando, por medio de procesadores de datos, la emisión de corrientes de aire a presión que retiran los materiales cerámicos y refractarios.

4.5.1 Selección del equipo

Después de una extensa búsqueda en diferentes medios, se encontró la oferta de dos equipos que utilizan el método óptico, aún y cuando utilizan diferentes principios de operación para identificar y separar materiales cerámicos y refractarios. A continuación, se describen ambos sistemas:

1. Marca ColorSort™, modelo GCS-384 fabricado por MSS Inc. en Estados Unidos de América:

Este equipo selecciona materiales cerámicos y refractarios de una corriente de cullet con partículas de tamaño homogéneo de 9.5 a 50.8 mm, previamente procesado por un separador magnético y uno de vacío.

El cullet se carga por medio de un alimentador vibratorio de acero inoxidable, que hace pasar el cullet frente a un arreglo de sensores que identifica el grado de opacidad y el color verdadero de cada partícula de cullet utilizando un sistema de cómputo de procesamiento paralelo MIPS 400.

El sistema utiliza diodos emisores de luz (LED) como fuente luminosa en cuatro diferentes longitudes de onda: para luz azul, verde, roja y cercana al infrarrojo (NIR). Para una mejor discriminación de los cerámicos, el LED de NIR produce dos pulsos, uno de intensidad normal y uno adicional de alta intensidad. Los LEDs se colocan en línea por donde se desliza el cullet sobre una cubierta de desgaste y se disparan con un ligero retraso en tiempo (de acuerdo con su posición en la línea) para asegurar que el color se determina para la misma partícula de cullet para las cuatro frecuencias. Los LEDs funcionan a una frecuencia de aproximadamente 1000 Hz, lo que produce una lectura por milisegundo a todo lo ancho de la unidad de selección.

Para cada LED transmisor existe un fotodiodo correspondiente de detección que determina la absorción de la longitud de onda apropiada. Estos detectores se colocan de manera complementaria a los transmisores.

El doble pulso emitido para la mejor identificación de los materiales cerámicos aumenta la sensibilidad y reduce las pérdidas de vidrio desviado hacia la corriente de dichos materiales cerámicos, aún y cuando se maneje cullet ámbar o de vidrio grueso, o vidrio con etiquetas de papel.

El equipo puede detectar mejor el color, y por lo tanto alcanzar una eficiencia mayor en la selección, con cullet lavado y limpio que con cullet seco con polvo. El cullet húmedo no afecta al sistema de selección del equipo, siempre que no exista un exceso de agua en el mismo. Lo que es más importante, es que la detección no se ve afectada por la acumulación de suciedad sobre la cubierta de desgaste de vidrio. Ya que utiliza la tecnología de proceso de señales digitales, el software del equipo se normaliza por sí mismo varias veces cada segundo, lo que lo hace capaz de "ignorar" la suciedad, aún y cuando la cubierta de desgaste parezca sucia a simple vista. Los sensores funcionan solo en cuatro longitudes de onda específicas con niveles muy altos de sensibilidad. Por lo tanto, no es necesario tener agua, aire o dispositivos mecánicos adicionales para propósitos de autolimpieza, consecuentemente, los requisitos de mantenimiento son mínimos. La limpieza mecánica de la cubierta de desgaste del sensor se puede llevar a cabo mientras la máquina funciona a plena capacidad; sin embargo, es necesario detenerla para limpiar la cubierta de desgaste de vidrio del lado de la recepción.

Mediante una pantalla de color de contacto se tiene acceso a todos los parámetros, afinación de la pureza del color, informes de los datos de la selección y diagnóstico del sistema. Cuenta con modem integrado que permite el diagnóstico y supervisión remoto desde la planta.

Características técnicas

Modelo ColorSort™	GCS-384
Ancho del alimentador	1200 mm (48")
Alimentación en modo selección de color	5 ton/hr
Alimentación en modo selección de cerámicos	20 ton/hr
Tamaño de partícula de alimentación	9.5 a 50.8 mm
Eficiencia de remoción de materiales	Mayor del 95% para los colores objetivo
Requerimientos eléctricos	220 VCA, 50/60 Hz
Consumo de potencia	2 kW
Presión de aire	7 bar (100 psi)
Uso del aire	Depende del flujo de alimentación
Dimensiones L x A x P	1.9 x 1.7 x 1.8 m

(73" X 68" X 71")

2. Marca MikroSort® fabricado por Mogensen GmbH en Alemania.

La corriente de alimentación se separa en piezas individuales en un alimentador vibratorio integrado de 1200 mm de ancho y pasa en caída libre frente a una cámara de color en línea en donde se lleva a cabo la clasificación de acuerdo con el color real de las partículas. Posteriormente se utiliza la más avanzada tecnología de proceso de señales, que hace posible manejar hasta 60 millones de puntos de datos por segundo, por medio de los cuales se pueden identificar y evaluar más de 10.000 objetos por segundo. Cuenta con dos sistemas de análisis de imágenes, un sensor de alta resolución y un procesador para el proceso de las imágenes exploradas.

La selección de las partículas se efectúa por medio de corrientes de aire comprimido unos cuantos centímetros abajo de la etapa de identificación. En este punto se accionan y controlan hasta 256 canales independientes (boquillas de aire comprimido) que producen pulsos de aire que dependen del tamaño de la partícula. Estas corrientes de aire desvían las piezas individuales según se requiera para llevar a cabo el proceso de separación. Posteriormente, el producto aceptable y las corrientes de producto rechazado se transportan individualmente.

El material se selecciona de acuerdo con los siguientes criterios: brillantez de la superficie del material y tamaño de las partículas.

Con este equipo se alcanza hasta un 99% de eficiencia en la selección del producto. La alta precisión de las corrientes de aire minimiza la pérdida de producto aceptable en el flujo de producto rechazado.

Este equipo tiene una capacidad de proceso de cullet hasta de 8 toneladas por hora.

Características técnicas

Modelo MikroSort®	
Ancho del alimentador	1,2 m
Alimentación en modo selección de color	8 ton/hr
Alimentación en modo selección de cerámicos	20 ton/hr
Tamaño de partícula de alimentación	5 a 60 mm
Eficiencia de remoción de materiales	99%
Requerimientos eléctricos	220 VCA, 50/60 Hz
Consumo de potencia	2 kW

Presión de aire

7 bar (100 psi)

Uso del aire

Depende del flujo de alimentación

Dimensiones L x A x P

Con la finalidad de seleccionar el equipo más adecuado, a continuación se definen las especificaciones y los criterios que se utilizarán para su evaluación, así como los rangos de calificación de cada uno de ellos. Por otro lado, en la tabla de selección se indica la ponderación asignada a cada uno de los criterios de selección.

Especificaciones

Conforme a las necesidades detectadas para el proceso de limpieza del cullet, en la Tabla 4.8 se muestran las especificaciones necesarias/deseables del equipo para la separación de materiales cerámicos y refractarios.

Especificación	Necesaria	Deseable
<u>Propósito</u>		
Retirar materiales cerámicos y refractarios	X	
<u>Parámetros</u>		
Material de entrada		
Estado: limpio		X
Tamaño de partícula: homogéneo	X	
<u>Proceso</u>		
Capacidad: 5 toneladas por hora	X	
Tipo: continuo		
Dimensiones: reducidas	X	
<u>Operación</u>		
Limpieza: continua	X	
Mantenimiento: mínimo		
Energía eléctrica: disponible en la industria		
Vida útil: 12 años	X	
Instalación: en línea de proceso		X
Sistema de alimentación	X	

Tabla 4.8 Especificaciones necesarias/deseables del sistema de separación de materiales cerámicos y refractarios

Criterios y calificaciones

✓ Eficiencia

Se define como el porcentaje en peso de la fracción de materiales cerámicos y refractarios extraído de la corriente de cullet respecto del total de este tipo de contaminantes en dicho cullet, cuya calificación será la siguiente:

- 3 = Eficiencia igual o superior a 99%.
- 2 = Eficiencia de 95% a 98.9%.
- 1 = Eficiencia inferior a 95%.

✓ **Capacidad**

Se refiere al volumen de cullet que puede manejar cada uno de los equipos y se buscará satisfacer las necesidades detectadas. La calificación será la siguiente:

- 3 = 5 ton/hr o más.
- 2 = De 4 a menos de 5 ton/hr.
- 1 = Menos de 4 ton/hr.

✓ **Facilidad de operación**

Se define como la el menor número de actividades y operarios y la menor complejidad de los procedimientos requeridos para accionar el equipo y se asignará la siguiente calificación.

- 3 = Un operario con un solo procedimiento y un solo punto de control.
- 2 = Dos operarios y/o más de un procedimiento y/o más de un punto de control.
- 1 = Más de dos operarios.

✓ **Dimensiones**

Con este criterio se buscará el equipo de menores dimensiones que permita su incorporación en el sistema de limpieza del cullet.

- 3 = Dimensión mayor del equipo menor a 2 metros.
- 2 = Dimensión mayor del equipo superior a 2 metros, pero inferior a 3 metros.
- 1 = Dimensión mayor del equipo igual o superior a 3 metros.

✓ **Complejidad**

Se entiende como el número de componentes que integran el equipo y se buscará seleccionar aquel que tenga el menor número de ellos.

- 3 = Hasta 5 componentes.
- 2 = De 5 a 10 componentes.
- 1 = Más de 10 componentes.

✓ **Tamaño de la partícula a alimentar**

Se refiere al tamaño de las partículas de cullet que constituirán la alimentación del equipo. La mayor calificación deberá de asignarse al mayor rango de tamaño de partícula ya que

entre menor sea el límite inferior, mayor será el volumen aprovechable de cullet y por otro lado, entre mayor sea el límite superior, menor será la necesidad de reducir el tamaño de partícula del cullet en una etapa anterior del proceso.

- 3 = Admite cualquier tamaño de partícula
- 2 = Admite un rango medio de tamaño de partícula
- 1 = Admite un rango bajo de tamaño de partícula

Nota: Teniendo en cuenta que el cullet se presenta con diversos tamaños de partículas y los equipos para separación de materiales refractarios y cerámicos tienen restricciones en este sentido, se considera necesario incluir dentro del proceso, antes de la etapa de separación de materiales cerámicos y refractarios (al igual que en la etapa de separación de materiales no ferrosos) un equipo para la molienda de cullet que permita entregar un tamaño de partícula que cumpla con las especificaciones de estos equipos.

En la tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos para la selección del equipo de separación de materiales cerámicos y refractarios del cullet.

Criterio	Calificación por Equipo	
	ColorSort™	MikroSort®
Eficiencia	2	3
Capacidad	3	3
Facilidad de operación	3	3
Dimensiones	3	3
Complejidad	3	3
Operación continua	3	3
Tamaño de partícula	1	2
Totales	18	20
Porcentaje respecto del ideal	0.86	0.95

Tabla 4.9 Selección del equipo de separación de materiales cerámicos y refractarios

Capítulo 5

Integración del Sistema

Introducción

En este capítulo se procederá a integrar el sistema de limpieza de cullet a partir de los equipos elegidos en el capítulo anterior, con base en sus características físicas y de operación, procediendo a incorporarlos al sistema y diseñando los dispositivos de enlace así como el equipo que resulte necesario y del cual no existe una opción comercial disponible de acuerdo a las necesidades.

Al final de este capítulo, se contará con el diseño integral del sistema de limpieza de cullet.

5.1 Resumen de las características de los equipos comerciales seleccionados

Como se determinó en el capítulo anterior, se eligieron diversos equipos para retirar del cullet los diversos contaminantes no deseados.

A continuación, se exponen las características físicas (principalmente dimensiones) y de operación que es necesario tener en cuenta para la integración de los equipos como un sistema integral:

Equipo	Dimensiones	Características de operación
Separación de materiales ferrosos		
 Iman permanente tipo cajón	Largo: 1 m Ancho: 0.75 m Alto: 0.30 m Peso: 150 kg	Forma de montaje: Suspensión sobre banda transportadora. Características de entrada del producto: Tamaño: Cualquier tamaño Condiciones: Ninguna Alimentación: continua, automática o manual Características de salida del producto: Tamaño: Mismo tamaño de entrada Condiciones: Sin metales ferrosos Descarga: continua por gravedad

Separación de materiales no ferrosos		
 <p>ECS-24\" REA Standard</p>	<p>Largo: 5.7 m Ancho: 1.9 m Alto: 2 m Peso: 3.175 kg</p>	<p>Forma de montaje: Sobre el piso o soporte. Características de entrada del producto: Tamaño: de 9.5 a 50.8 mm Condiciones: Seco Alimentación: continua automática Características de salida del producto: Tamaño: Mismo tamaño de entrada Condiciones: Sin metales no ferrosos Descarga: continua por gravedad</p>
Separación de materiales orgánicos		
 <p>Despedregadora a presión Serie G</p>	<p>Largo: 1.6 m Ancho: 1.26 m Alto: 1.82 m Peso: 534 kg</p>	<p>Forma de montaje: Sobre el piso o soporte. Características de entrada del producto: Tamaño: Uniforme Condiciones: Seco Alimentación: continua automática Características de salida del producto: Tamaño: Mismo tamaño de entrada Condiciones: Sin materiales orgánicos Descarga: continua por gravedad</p>
Separación de materiales cerámicos y refractarios		
	<p>Largo: 5.65 m Ancho: 3.2 m Alto: 4.45 m Peso: 3.750 kg</p>	<p>Forma de montaje: Sobre el piso o soporte. Características de entrada del producto: Tamaño: 6 a 60 mm Condiciones: Seco o húmedo Alimentación: continua automática Características de salida del producto: Tamaño: Mismo tamaño de entrada Condiciones: Sin materiales cerámicos Descarga: continua por gravedad</p>

5.2 Propuesta del proceso de separación de contaminantes del cullet

Considerando las características de los equipos señalados, principalmente las dimensiones y la forma de alimentación y salida de materiales de cada uno de ellos, a continuación se propone un arreglo preliminar del proceso de separación de contaminantes del cullet, el cual se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 5.1.

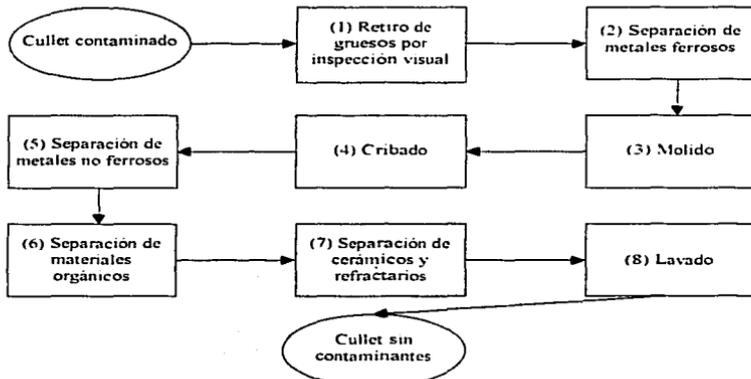


Figura 5.1. Diagrama de proceso de limpieza del cullet

Sobre esta propuesta preliminar, es conveniente hacer los siguientes comentarios:

La etapa "Retiro de gruesos por inspección visual" (1), se refiere a una operación que se considera incluíble dentro del proceso de limpieza del cullet: la separación, por medio de uno o varios operadores, de materiales contaminantes fácilmente identificables a simple vista, como piezas o fragmentos grandes de madera, papel, metal, textiles, plásticos, cerámicos, minerales, etc., esta operación es necesaria debido a la gran diversidad de materiales y dimensiones, los cuales no podrían separarse eficientemente mediante un proceso mecanizado y que obstaculizarían las diferentes operaciones posteriores, en particular el molido, en el cual grandes trozos de papel, textil, madera o metal podrían atascar o dañar el equipo.

La "Separación de metales ferrosos" (2), consiste en una separación de este tipo de materiales por medios magnéticos, cuya finalidad es evitar que estos últimos interfieran con la siguiente etapa del proceso, ya que pudieran dañar el equipo utilizado en ella.

La etapa "Molido" (3), complementada con la etapa "Cribado" (4), servirán para reducir el tamaño de las partículas de cullet contaminado, con lo que se persiguen dos objetivos: eliminar las partículas finas con tamaño inferior a 9.5 mm, con lo que se retirarán principalmente los contaminantes cerámicos y refractarios, y dar un tamaño más uniforme a las piezas de cullet para facilitar su manejo en las etapas posteriores del proceso, especialmente en las etapas de separación de metales no ferrosos y de cerámicos y refractarios, cuyos equipos comerciales tienen restricciones en el tamaño de las partículas del cullet que manejan.

Posteriormente, se procederá a separar los metales no ferrosos (5) mediante el principio de las corrientes de eddy, para continuar con las etapas de separación de materiales orgánicos (6) y los cerámicos y refractarios (7).

A continuación, a la salida de la máquina separadora de refractarios y aprovechando la fase de transporte entre ésta y el punto final de entrega del cullet, se incluirá el sistema de lavado (8) para separar los finos que hubieran podido generarse o adherirse durante todo el proceso y que la empresa considera indeseables.

Ya que se trata de una propuesta preliminar, ésta podrá sufrir modificaciones y adecuaciones conforme se avance en el desarrollo de la etapa de integración.

Siempre en razón de las características de los equipos comerciales componentes del proceso, y con la finalidad de reducir al mínimo las necesidades de transporte entre los mismos, se procedió a agruparlos de la manera que se señala a continuación, la cual incluye los sistemas auxiliares necesarios para la operación.

Bloque 1 Alimentación-transporte-separación de ferrosos-molido-cribado.
Comprende el siguiente equipo:

- Alimentador para dosificar y regular la alimentación de cullet contaminado al sistema de transporte con el que se inicia el proceso.
- Transportador para elevar el cullet contaminado al nivel del equipo de molido.
- Equipo de separación de metales ferrosos.
- Molino.
- Mecanismo de conexión de la salida del molino a la entrada de la criba.
- Criba.
- Mecanismo de descarga de la criba.

Bloque 2 Transporte-separación de orgánicos-separación de no ferrosos. Comprende el siguiente equipo:

- Transportador para elevar el cullet al nivel del equipo de separación de metales no ferrosos.
- Mecanismo de conexión de la descarga del equipo separador de metales no ferrosos al separador de materiales orgánicos.
- Equipo de separación de materiales orgánicos.
- Mecanismo de descarga del separador de orgánicos.

Bloque 3 Transporte-separación de cerámicos y refractarios-transporte-lavado. Comprende el siguiente equipo:

- Transportador para elevar el cullet al nivel del equipo de separación de materiales cerámicos y refractarios.
- Mecanismo de descarga del separador de cerámicos y refractarios.
- Transportador de la descarga del separador de cerámicos al punto de entrega del cullet limpio.
- Sistema de lavado.
- Equipo para la segunda separación de metales ferrosos.

De la comparación del equipo que integra estos bloques con los equipos seleccionados en el Capítulo anterior, se observa que es necesario determinar los siguientes elementos:

- Alimentador para dosificar y regular la alimentación de cullet contaminado al sistema de transporte con el que se inicia el proceso.
- Transportador para elevar el cullet contaminado al nivel del equipo de molido.
- Mecanismo de conexión de la salida del molino a la entrada de la criba.
- Criba.
- Mecanismo de descarga de la criba.
- Transportador para elevar el cullet al nivel del equipo de separación de metales no ferrosos.
- Mecanismo de conexión de la descarga del equipo separador de metales no ferrosos al separador de materiales orgánicos.
- Mecanismo de descarga del separador de orgánicos.
- Transportador para elevar el cullet al nivel del equipo de separación de materiales cerámicos y refractarios.
- Mecanismo de descarga del separador de cerámicos y refractarios.
- Transportador de la descarga del separador de cerámicos al punto de entrega del cullet limpio.
- Sistema de lavado.
- Estructuras de soporte para los equipos elevados.

Estos elementos pueden agruparse en cinco familias:

1. Equipos adicionales: alimentador, molino y criba
2. Transportadores-elevadores de cullet.
3. Mecanismos de conexión entre equipos.
4. Sistema de lavado de cullet.
5. Estructuras de soporte de equipos elevados (molino y separación de metales no ferrosos).

En la Figura 5.2 se muestra el arreglo por bloques del sistema.

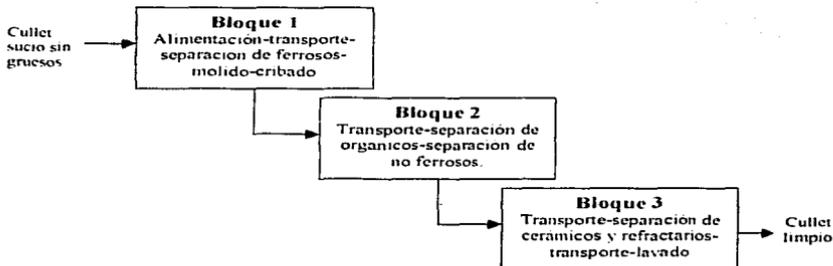


Figura 5.2 Arreglo por bloques del sistema de limpieza de cullet

A continuación, se procede a seleccionar y/o diseñar los equipos y dispositivos necesarios para la total integración del sistema.

Alimentador

Este equipo es necesario para alimentar, dosificando y regulando el flujo del cullet contaminado (ya revisado ocularmente retirando piezas grandes, fácilmente observables) al transportador-elevador que lo llevará a la entrada del equipo de molido.

Para este caso, se realizó una investigación y se encontró que existen dispositivos alimentadores vibratorios que pueden realizar esta función satisfactoriamente. Los resultados de la investigación son los siguientes:

La aplicación más usual de equipos vibratorios es de accionamiento electromagnético o electromecánico. Por lo general se instalan debajo de silos, depósitos o tolvas, dirigiendo la masa de materiales a granel sobre bandas, hélices transportadoras, cribas vibratorias, etc. Tienen capacidad de manejo de flujos de hasta 1000 m³/h. El empleo de estos equipos es prácticamente obligatorio en sistemas para pesar, como dosificadoras de doble velocidad (carga y ajuste), en la carga de tolvas pesadoras o como válvula de descarga de éstos. Se puede regular su velocidad mediante voltaje (opcionalmente con reguladores automáticos o remotos, por medio de PLC's) en el caso de los electromagnéticos, o por frecuencia, en el caso de los electromecánicos.

Alimentadores para trabajo ligero y medio (Figura 5.3)

- Aseguran la alimentación y control de material que fluye a velocidades de unos cuantos kilogramos hasta toneladas por hora.
- Unidades montadas en bases con una amplia variedad de charolas.
- Cada uno de los modelos incluye una variada selección de charolas.
- Velocidades de alimentación de 2.5 kg/hr a 25 ton/hr.
- Controlador alimentador estándar.
- Controladores magnéticos dentro de cajas.
- Eficiencia en la operación de energía de C.A.

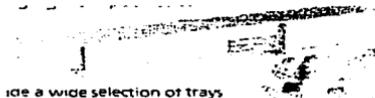


Figura 5.3 Alimentador para trabajo ligero y medio

Alimentador volumétrico (Figura 5.4)

Cada máquina incluye un embudo, alimentador, vibrador y control.

- Asegura el flujo de material grueso seco para balanzas, empaçado y equipo de embolsado, separación en lotes pequeños y alimentador de aditivos.
- Dos modelos estándar con velocidades de alimentación superiores a 15 ton/hr.
- Ideal para grandes volúmenes de empaçado y sistema de embolsado.
- Modelos especiales de embolsado.



Figura 5.4 Alimentador volumétrico

Alimentadores mecánicos de alto volumen (Figura 5.5)

- Baja potencia.
- Alimentación mecánica, alta capacidad de materiales.
- Manejo de materiales gruesos.
- Volúmenes superiores a 250 ton/hr
- Gran variedad de tamaños y tipos disponibles.
- Suministro, seguridad en el control de relaciones de flujo.
- Simple, estable y de control variable.



Figura 5.5 Alimentador mecánico de alto volumen

Alimentador vibratorio de alta velocidad (Figura 5.6)

- Alimentador de alta velocidad de materiales ligeros y pesados.
- Características de frenado rápido, asegura un manejo seguro de los materiales para economía y eficiencia en lotes.
- 9 modelos de alta velocidad
- Ideal para el mezclado, pesado, lote, empaclado y operación de embolsado.
- Operación de 40 a 600 (ft³/hr).



Figura 5.6 Alimentador vibratorio de alta velocidad

Alimentadores de zapata

Servicio Extra Pesado

Para: Canteras - Minas - Cementeras

Tabla de Especificaciones
(toneladas por hora)

		Ancho del alimentador					
		24"	30"	36"	42"	48"	60"
Velocidad (pies/min)	10	40	70	100	140	190	280
	20	80	140	200	280	380	565
	30	140	215	310	425	560	850
	40	190	290	420	570	740	1140

La correcta dosificación de la carga asegura una producción óptima y menos atascamientos, eliminando tiempos muertos.

Esta regulación de carga se obtiene mediante Alimentadores de Zapata primarios para trabajo extra pesado.

Las zapatas son de acero formado y atornilladas a cadenas de rodillos tipo tractor de carriles y las catarinas son de acero vaciado para trabajo extra pesado.

Las cadenas se deslizan por rieles unidos al bastidor, los cuales soportan la carga. Las chumaceras están formadas por una robusta caja de acero con sellos de laberinto y rodamientos antifricción tipo trabajo rudo, los cuales soportan el eje principal y el conducido.

Alimentadores vibratorios

Servicio Extra Pesado

Para: Canteras - Minas - Cementeras

Tabla de Especificaciones
(toneladas por hora)
Capacidades a una densidad de 1600 kg/m³

		Ancho del alimentador							
		30"	35"	42"	48"	54"	60"	72"	84"
Inclinación	0°	275	350	400	475	525	600	725	850
	5°	375	450	525	600	675	750	900	1050

Índice de frecuencia variable

Los contrapesos adicionales no sólo permiten vibraciones mayores, sino también permiten ajustes rápidos y simples de vibraciones. No necesario cambiar flechas o cambiar algún mecanismo mayor o menor. Se puede alterar la excentricidad solamente añadiendo, quitando o modificando la posición de estos contrapesos de ajuste. El acceso es simple por medio de cubiertas de tubo removibles localizadas a cada lado del mecanismo.

Engranajes sincronizados

Un par de engranes de precisión de trabajo pesado, construidos especialmente para vida prolongada utilizando una aleación de acero especial, complementan la selección de rodamientos y el diseño del eje principal en la unidad del mecanismo vibrador. Estas partes aseguran que las dos flechas siempre permanezcan sincronizadas y que todos los contrapesos estén trabajando juntos a su máxima efectividad. El ángulo de descarga no cambia, pero puede modificarse solamente regrauando los engranes cuando sea necesario en los cambios de producción.

Selección de Alimentador Vibratorio

Para la selección del Alimentador vibratorio (Figura 5.7) se tomaron en cuenta algunas de las características que requiere el proceso, las cuales se mencionan a continuación:

Capacidad de alimentación 5 ton/hr.

Dimensiones de el equipo para el ancho de banda establecido.

Alimentación del Material en forma constante.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 5.7 Alimentador vibratorio seleccionado

El siguiente equipo mostrado es el que reúne las características deseadas por el proceso para la alimentación del cullet hacia la banda transportadora en forma constante.

Vibrador de tarea pesada.

Características:

Diseñado para grandes capacidades y para materiales de difícil operación o manejo.

Bajo consumo de energía

Alta productividad, bajo costo y alta rentabilidad.

9 diferentes modelos para diferentes capacidades (se dimensionará según el requerimiento del proceso).

Rango de alimentación de 60 ton/hr a 250 ton/hr.

Es un equipo inclinable.

Molino

Este equipo es necesario para reducir el tamaño de las partículas de cullet, con dos objetivos fundamentales: facilitar su manejo en las secciones de transporte entre los equipos integrantes del proceso y conformarlo a las necesidades de algunos equipos de separación de contaminantes, específicamente los de separación de metales no ferrosos y de cerámicos y refractarios, los cuales tienen restricciones en cuanto al tamaño de partícula que admiten.

En consideración a dichas restricciones, el tamaño de las partículas de cullet deberá reducirse a un mínimo de 50,8 mm, que es la restricción correspondiente al equipo de separación de metales no ferrosos.

Se procedió a hacer una investigación sobre los equipos comerciales existentes para el molido del cullet, encontrándose los siguientes:

Proveedor: Special Service Consultants

Trituradora primaria de mandíbula modelo JPC 2540 (Figura 5.8)

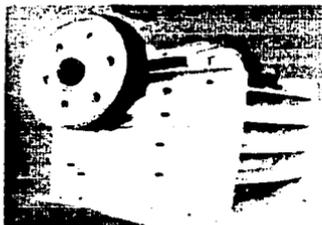


Figura 5.8 modelo JPC 2540

Trituradora secundaria de mandíbula modelo JSC 1060 (Figuras 5.9 y 5.10)

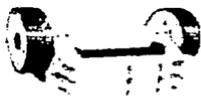


Figura 5.9



Figura 5.10

Trituradora de cono modelo CCs 600 (Figura 5.11)



Figura 5.11. Modelo CCs 600

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Proveedor: Productos Asteca, S. A.

TRITURADORA DE MANDIBULAS TR (Figura 5.12)
Con engrase independiente.

Las trituradoras de mandíbulas TR son quebrantadoras para rocas de gran tenacidad que reúnen las siguientes características:

- Elevada producción con bajo consumo de energía.
- Construcción indeformable.
- Cámara de trituración profunda.
- Elevada velocidad.
- Dimensionado de la línea del árbol con rodamientos de gran capacidad.
- Gran facilidad para modificar el reglaje.

Bastidor: Monobloque construido en acero especial, totalmente soldado y estabilizado. Fuertemente nervado para eliminar todo tipo de deformaciones.

Línea del Arbol: Eje excéntrico en acero cromoniquel forjado, montado sobre rodamientos de doble hilera de gran capacidad.

Biela porta-mandíbulas: En acero moldeado, diseñada para soportar reiterados esfuerzos. Frontal nervado para proteger la cámara de rodamientos. Tapas laberínticas con engrase independiente.

Muelas de acero manganeso intercambiables de dos posturas con base mecanizada.

Placa de articulación: Tratada mediante inducción, así como los tejuelos de apoyo. Engrase en toda su longitud.

Regulación hidráulica o manual, según el tamaño de la trituradora, con calces separadores de distintos groesos.

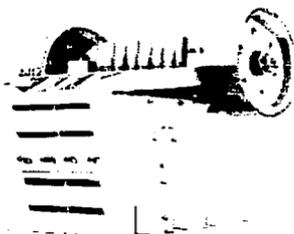


Figura 5.12 Trituradora de mandíbulas TR

Extremadura 2000 de Transformados Metálicos. S. A.

MOLINOS IMPACTADORES

Molinos impactadores para materias muy abrasivas

Principales ventajas:

- bajo costo de inversión.
- reducido costo por tonelada de proceso.
- Cómodo mantenimiento.
- Piezas de desgaste intercambiables.
- Partes de desgaste fácilmente accesibles.
- Apertura hidráulica.
- Excelente curva granulométrica y perfecta cubicidad.

Selección del molino

Especificaciones

Conforme a las necesidades detectadas para el proceso de limpieza del cullet, en la tabla 5.1 se muestran las especificaciones necesarias/deseables del equipo para la molienda.

Especificación	Necesaria	Deseable
Propósito		
Estandarizar el tamaño máximo de las partículas de cullet	X	
Proceso		
Capacidad: 5 ton/hr.	X	
Tipo: continuo	X	
Dimensiones: reducidas		X
Operación		
Mantenimiento: mínimo	X	
Energía eléctrica: disponible en la industria	X	
Vida útil: 12 años		X
Instalación: en línea de proceso	X	

Tabla 5.1 Especificaciones necesarias/deseables del sistema para la molienda

Criterios y calificaciones

✓ Capacidad

Se refiere al volumen de molienda que puede manejar cada uno de los equipos y se buscará satisfacer las necesidades detectadas. La calificación será la siguiente:

- 3 = 5 ton/hr o más
- 2 = 4 a menos de 5 ton/hr.
- 1 = menos de 4 ton/hr.

✓ Facilidad de operación.

Se define como la del menor número de activadaes y operarios y la menor complejidad de los procedimientos requeridos para accionar el equipo y se asignará la siguiente calificación:

- 3 = un operario con un solo procedimiento y un solo punto de control
- 2 = dos operarios y/o más de un procedimiento y/o más de un punto de control
- 1 = más de dos operarios.

✓ Dimensiones.

Con este criterio se buscará el equipo de menores dimensiones que permita su incorporación en el sistema de molienda.

- 3 = dimensión mayor del equipo, menor a 2 m
- 2 = dimensión mayor del equipo superior a 2 m, pero inferior a 3 m
- 1 = dimensión mayor del equipo igual o superior a 3 m

✓ Complejidad.

Se entiende como el número de componentes que integran el equipo y se buscará seleccionar aquel que tenga el menor número de ellos.

3 = hasta cinco componentes

2 = de 5 a 10 componentes

1 = más de 10 componentes

✓ Potencia consumida

Basada en la cifra total dada por el fabricante o por la suma de la potencia de los motores.

3 = menos de 20 HP

2 = entre 10 y 20 HP

1 = más de 30 HP

En la Tabla 5.2 de la siguiente página se muestran las calificaciones alcanzadas por cada uno de los modelos de molinos mencionados.

Con base en la evaluación mostrada en dicha tabla, se concluye que el molino a utilizar es el modelo JPC 2540 de Special Service Consultants.

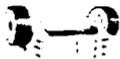
Modelo/Criterios	Capacidad	Facilidad de operación	Dimensiones	Complejidad	Potencia consumida	Total	Evaluación
	3	3	1	2	2	11	73%
	3	3	3	2	3	14	93%
	3	2	2	1	2	10	66%
	3	3	1	2	2	11	73%
	3	3	2	2	1	11	73%
	3	2	1	1	2	9	60%

Tabla 5.2 Evaluación y selección del molino.

Criba

Por lo que se refiere a la criba, a continuación se muestran las alternativas comerciales localizadas en la investigación.

URBAR Ingenieros S. A.

Cribas vibratorias Serie KS (Figuras 5.13 a 5.15)

- Superficies de cribado de más de 30 m².
- Caudales de hasta 1500 t/hr.
- Para granulometrias entre 0.5 y 150 mm.
- Accionamiento mediante un motor eléctrico con eje cardán.
- Con uno o dos pisos.
- Con mallas metálicas o de poliuretano.

Descripción.

Las cribas vibratorias de la serie KS transmiten al producto a manipular un movimiento multidireccional o circular. Se trata de equipos que por lo general actúan como pre-cribadores y se utilizan en la separación de productos de todo tipo, cuya granulometría se sitúa entre 5 y 150 mm, alcanzando un caudal de hasta 1500 t/hr.

Funcionamiento.

El accionamiento se lleva a cabo por medio de un motor eléctrico con un eje cardán conectado al eje principal equipado con dos masas excéntricas ajustables a cada lado del eje, que incorpora rodamientos de rodillos especiales lubricados con grasa. La velocidad y la amplitud de la vibración se adaptan a los diferentes productos obteniendo así la mayor eficiencia de cribado.

Mallas

Las mallas utilizadas por la serie KS en la operación de cribado pueden ser de los siguientes tipos:

- de poliuretano o de goma.
- en cascada, tipo grizzly.
- Metálicas.
- metálicas perforadas.
- metálicas vulcanizadas.

Con el objeto de simplificar el montaje, los elementos de cribado quedan sujetos preferiblemente sin tornillos.

Sectores de aplicación. Productos.

Las aplicaciones típicas son las canteras, las plantas de áridos, las graveras, el reciclaje de residuos, la minería.

Los productos más habitualmente tratados son los siguientes: carbón, arena, caliza, dolomita, grava, escorias.

En algunos casos, se puede implementar la criba con una instalación de riego o con una cubierta hermética al polvo.



Figura 5.13



Figura 5.14



Figura 5.15

URBAR ingenieros S. A.

Cribas vibratorias Serie V (Figuras 5.16 y 5.17)

- 2 o 3 clasificaciones, en versión estándar.
- 3 posibilidades de ejecución: abierta, abierta con tolva de recogida de finos, totalmente hermética.
- Instalación horizontal, inclinada, apoyada o suspendida.
- Accionamiento mediante un vibrador eléctrico de fabricación propia, posicionado de forma normal o invertida.

Las cribas de la serie V están accionadas por un vibrador eléctrico externo, de fabricación propia, tipo REX-21 o bien REX-51, según el dimensionamiento, frecuencia o aceleración necesarios para cada caso, produciendo siempre una vibración multidireccional.

Las cribas herméticas (E) suelen ir provistas de registros para la inspección de su interior, así como de tomas de captación de polvo, según los requerimientos específicos de cada caso.



Figura 5.16

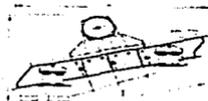


Figura 5.17

URBAR Ingenieros S. A.

Cribas estadísticas Serie IM (Figura 5.18)

- Cribas de 3 a 6 pisos.
- Gran eficiencia en espacio reducido.
- Operación rápida de cambio de mallas.
- Buen comportamiento anticegamiento.
- Anchuras disponibles de 0.5 a 3 m.
- Accionadas por 2 vibradores eléctricos REX.

Las cribas de la serie IM están concebidas siguiendo el principio del cribado estadístico o de probabilidad. Este principio se basa en seleccionar las luces de malla, la frecuencia, la amplitud y el ángulo de vibración, así como la inclinación de las telas, buscando siempre la máxima probabilidad de paso de la partícula.

De este modo, se consigue que el cribado tenga lugar en muy pocos intentos de paso de la partícula (rebotes) o lo que es lo mismo, en muy poca longitud de malla y con muy poco tiempo de contacto del producto sobre las telas (menor desgaste).

Para aumentar la probabilidad de paso, a menudo es necesario el uso de varias telas que rechacen material por encima de la malla de corte, ya que la presencia de partículas con escasa posibilidad de paso sobre esta malla (gruesos), obstaculiza el paso de las partículas más finas. Por este motivo, es habitual el uso de varias telas para realizar un corte único, así, además, las telas más finas quedan protegidas de impactos.

Descripción

Las cribas estadísticas de la serie IM son del tipo multitamiz (de 3 a 6 telas) y se accionan por medio de dos vibradores eléctricos rotativos REX, de 4 ó 6 polos, de fabricación propia. Están formadas por un robusto bastidor monobloque, rigidizado por los propios travesaños de apoyo de las telas y el puente de fijación de los vibradores. Se fabrican en

cinco anchos estándar, de 0.5 a 3 metros. Existe la posibilidad de ejecución cerrada, hermética al polvo, bocas de salida circulares en las salidas de material, así como elementos adicionales para conseguir una correcta alimentación del material a cribar. El resultado final es un equipo compacto, posibilitando su colocación sobre estructuras soporte más sencillas y ligeras que en las cribas tradicionales.

Ventajas

- Se trata de un equipo compacto que facilita el montaje y simplifica la estructura soporte. La transmisión de la vibración queda considerablemente reducida, debido al menor tamaño y peso con respecto a una criba tradicional.
- Un sistema especial de tensado, mediante un encapsulado con muelles de platillo, permite mantener constante la tensión de la malla.
- Gracias a la utilización de varias telas, en muchos casos en número superior al número de cortes necesarios se obtienen separaciones fiables.
- El escaso tiempo de contacto del producto con la malla y el hecho de que la luz de malla sea mayor que el corte a realizar (debido a la inclinación de las telas) proporcionan un excelente comportamiento antiepegamiento.
- Las mallas se cambian desde la parte trasera de la máquina, en pocos minutos y por un solo operario, facilitando un mantenimiento sencillo.

Alimentación

Debido a la escasa longitud de las telas, es indispensable que la alimentación a la criba se realice de forma perfectamente uniforme en toda su anchura. Para el caso de cribas de 0.5 o 1 m de ancho, esta distribución se puede realizar por medio de canaletas estáticas correctamente estudiadas. Si la anchura de las cribas es superior a 1 m, se requiere el uso de dispositivos de reparto. Dependiendo de la aplicación, los dispositivos de reparto pueden formar parte de la misma máquina, a modo de boca de alimentación especial con tajadera interna o bien, ser dispositivos vibratorios de alimentación externos.

Colocación de las mallas

Como consecuencia del método estadístico, las mallas son mucho más cortas que en una criba convencional. De este modo, quedan apoyadas sobre los travesaños que incorporan un perfil de goma y se tensan longitudinalmente desde la parte trasera de la criba mediante un sistema elástico diseñado para mantener constante la tensión de la malla.

Sectores de aplicación

Productos tales como cal, caliza, caolín, carbón, cemento, cereales, chocolate, detergente, escorias, fertilizantes, granito, madera, sal, vidrio y yeso son de aplicación habitual en las cribas de la serie IM.

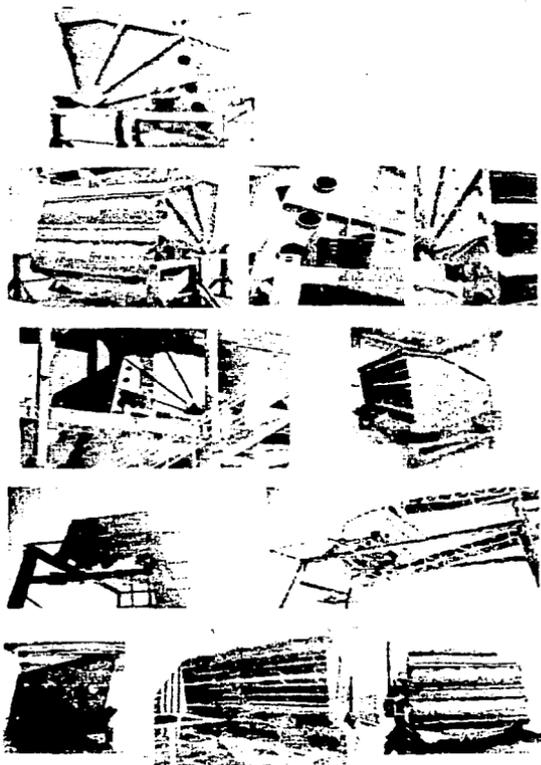


Figura 5.18 Diferentes modelos y arreglos de las cribas estadísticas Seric IM (cont.)

URBAR Ingenieros S. A.

Cribas vibratorias Serie B (Figuras 5.19 y 5.20)

- 2 o 3 clasificaciones, en versión estándar.
- 3 posibilidades de ejecución: abierta, abierta con tolva de recogida de finos, totalmente estanca.
- Instalación horizontal, inclinada, apoyada o suspendida.
- Accionamiento mediante 2 vibradores eléctricos REX, posicionados de forma normal o invertida.

Las cribas de la serie B se fabrican con uno o dos pisos de mallas. Ahora bien, se puede montar más de una malla en cada piso, consiguiéndose de este modo más clasificaciones.

El accionamiento queda asegurado por dos vibradores eléctricos externos, del tipo REX, según el dimensionamiento, frecuencia o aceleración necesarios para cada caso, produciendo siempre una vibración unidireccional.

Las cribas estancas (E) se equipan normalmente con registros para la inspección de su interior, así como de tomas de captación de polvo, según los requerimientos específicos.

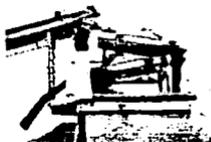


Figura 5.19

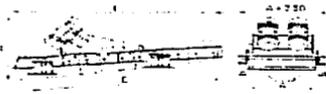


Figura 5.20

ArrowCorp

ArrowCorp tiene una serie Génesis de separadores de aire/criba modulares. La serie completa se diseñó con la ayuda de modelos computarizados tridimensionales, por lo que todos los módulos Génesis son el ejemplo de diseño de características simples con ventajas que no se encuentran en otros separadores de aire/criba. (Figuras 5.21 a 5.28).

Se pueden incorporar cuatro módulos de criba diferentes para hacer el montaje de las unidades específicas Génesis a la medida y tener docenas de diferentes capas y configuraciones, variando de 6 m² a 24 m² de área de cribado. La expansión futura

puede lograrse simplemente instalando un módulo de criba adicional a la unidad existente. Esto reduce el costo y tiempo inactivo de las expansiones futuras.

La transmisión por inercia elimina la necesidad de bielas y transmisiones complicadas. El sistema de transmisión de frecuencia variable permite al operador cambiar la longitud del recorrido total de 1.27 m a 2.54 m. El modelo Genesis de aire/criba es el único modelo de aire/criba que tiene esta característica como elemento estándar.

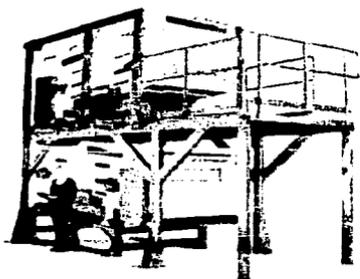


Figura 5.21



Figura 5.22

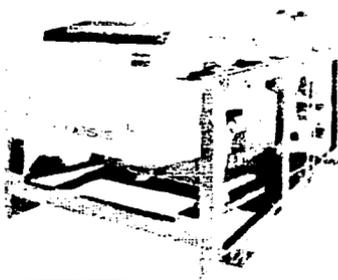


Figura 5.23

Figura 5.24

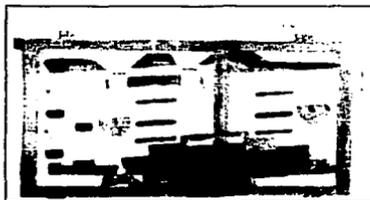


Figura 5.25



Figura 5.26 Modelo 496

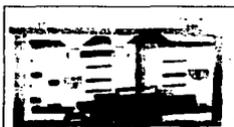


Figura 5.27 Modelo 296



Figura 5.28 Modelo 496

Cribas Vibratorias Rectangulares

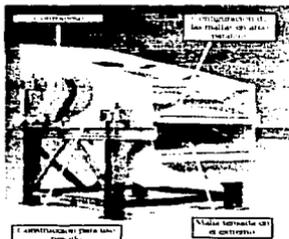


Figura 5.29

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Criba rectangular MEV (Figura 5.29)

Mextrade cuenta con una criba vibratoria "MEV", la cual está diseñada bajo el concepto de "Arco Paralelo" la cual entrega varias especificaciones de producto rápida y eficientemente.

Comenzando en el extremo superior de la criba MEV, se forma un arco mediante una serie de soportes que van por debajo de la malla. Con este diseño, el material que recién entra a la criba es retenido momentáneamente, lo cual permite que el material fino pase la malla rápidamente a través de las aberturas de la malla y hacia las mallas inferiores (más cerradas). El material retenido se mueve a lo largo de cada panel, el ángulo se incrementa acelerando así la velocidad de las partículas hacia la descarga. El cribado se realiza mediante el movimiento elíptico de la criba.

Esta criba cuenta con un sistema de tensión en la parte trasera, lo cual permite un cambio de malla muy rápido y simple, al contrario de las cribas "tradicionales" en las que las mallas se tensan por los costados y se requiere de muchas horas-hombre para realizar el cambio.

Ventajas de la MEV

- Cambio de malla en aproximadamente 10 minutos.
- Ahorros de energía 3 h.p (3' x 5'), 5 h.p. (4' x 8') y 10 h.p. (5' x 10').
- Uso de motores estándar.
- Construcción sólida en todos los modelos (tamaños).

Tamaños de la MEV

- 3' x 5' (.9144 m x 1.52 m)
- 4' x 8' (1.12 m x 2.42 m)
- 5' x 10' (1.52 m x 3.04 m)

Aplicaciones de la MEV

Dross de Aluminio
Bauxita
Coque
Detergentes
Oxido de Magnesio
Sal

Scrap de Aluminio
Vidrio quebrado
Arena p/Construcción
Fertilizantes
Polvo de Zinc
Arena Silice

Nitrato de Amonio
Carbonato de Calcio
Caliza
Granito
Mármol
Urea

Accesorios para MEV

Suspensión por cable
Pelotas de Limpieza
Cubierta anti - polvo

Barras de Spray
Distribuidor de Mat.
Entre otros....

Sistema de tensión automático
Calentamiento de Mallas

Las cribas MEV actualmente se utilizan en importantes grupos mineros de México, en distintas aplicaciones tanto secas como húmedas, en la industria de refractarios, etc.

Midwestern MULTI- VIB

Dentro de las cribas rectangulares Midwestern existe el modelo MULTI VIB. Por lo general, las cribas vibratorias se calculan utilizando dos dimensiones: ancho, que determina la capacidad, y largo, que determina la eficiencia.

La criba MULTI VIB de Midwestern toma en cuenta una tercera dimensión: PROFUNDIDAD. Esta dimension se realiza mediante la utilización de una criba de 5 camas puestas una sobre la otra para impartir un movimiento vertical muy rápido al material que está siendo cribado. Este concepto se denomina "Estratificación Vertical"

Estas cribas utilizan motovibradores localizados en la parte superior de la criba, que se encuentran conectados en rotación inversa para proporcionar un movimiento lineal. Al igual que las cribas MEV la MULTI VIB cuenta con un diseño de Arco Paralelo, aunque más inclinado que en la MEV. Figuras 5.30 y 5.31.

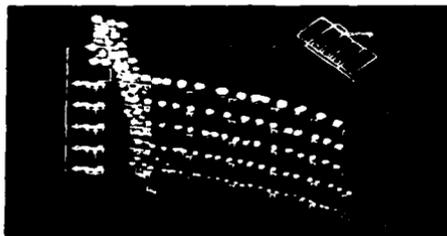
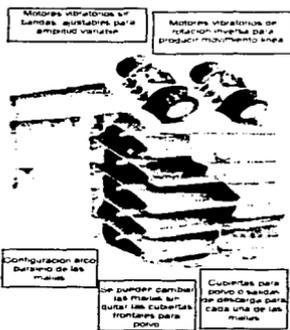


Figura. 5.31 Criba MULTI-VIB de Midwestern (sección transversal)

Figura 5.30 Criba MULTI-VIB de Midwestern

Screen Heating

Además de los modelos mencionados, existe un accesorio llamado "Screen Heater" (calentador de mallas) mediante el cual se logra tener un bajo porcentaje de aberturas tapadas debido a humedad. Este accesorio consiste en transformadores conectados a las mallas, que provocan el calentamiento de éstas. Este accesorio está disponible para cualquier marca de equipo, incluyendo los modelos TYLER (mostrado en la Figura 5.32).

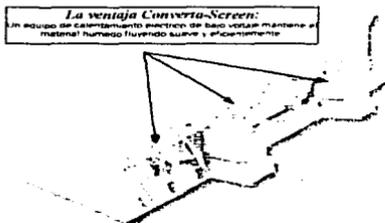


Figura 5.32 Calentador de mallas

Selección de la criba

Especificaciones

Conforme a las necesidades detectadas para el proceso de limpieza del cullet, en la tabla 5.3 se muestran las especificaciones necesarias/deseables del equipo para el cribado.

Especificación	Necesaria	Deseable
Propósito		
Estandarizar el tamaño máximo de las partículas de cullet	X	
Proceso		
Capacidad: 5 ton/hr.	X	
Tipo: continuo	X	
Dimensiones: reducidas		X
Operación		
Mantenimiento: mínimo	X	
Energía eléctrica: disponible en la industria	X	
Vida útil: 12 años		X
Instalación: en línea de proceso	X	

Tabla 5.3 Especificaciones necesarias/deseables del sistema para el cribado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Criterios y calificaciones

✓ Capacidad.

Se refiere al volumen del cribado que puede manejar cada uno de los equipos y se buscará satisfacer las necesidades detectadas. La calificación será la siguiente:

- 3 = 5 ton/hr o más
- 2 = 4 a menos de 5 ton/hr.
- 1 = menos de 4 ton/hr.

✓ Facilidad de operación.

Se define como la del menor número de actividades y operarios y la menor complejidad de los procedimientos requeridos para accionar el equipo y se asignará la siguiente calificación:

- 3 = un operario con un solo procedimiento y un solo punto de control
- 2 = dos operarios y/o más de un procedimiento y/o más de un punto de control
- 1 = más de dos operarios.

✓ Dimensiones.

Con este criterio se buscará el equipo de menores dimensiones que permita su incorporación en el sistema de molienda.

- 3 = dimensión mayor del equipo, menor a 2 m
- 2 = dimensión mayor del equipo superior a 2 m, pero inferior a 3 m
- 1 = dimensión mayor del equipo igual o superior a 3 m

✓ Complejidad.

Se entiende como el número de componentes que integran el equipo y se buscará seleccionar aquel que tenga el menor número de ellos.

- 3 = hasta cinco componentes
- 2 = de 5 a 10 componentes
- 1 = más de 10 componentes

✓ Potencia consumida.

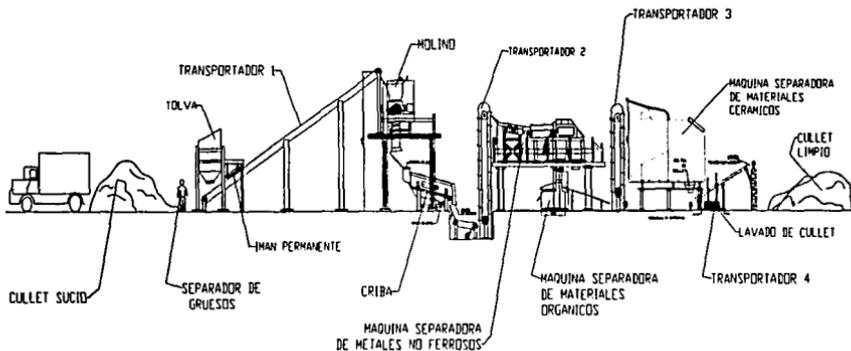
Basada en la cifra total dada por el fabricante o por la suma de la potencia de los motores.

- 3 = menos de 20 HP
- 2 = entre 10 y 20 HP
- 1 = más de 30 HP

En la Tabla 5.4 se muestran las calificaciones alcanzadas por cada uno de los modelos de cribas mencionados. Con base en la evaluación mostrada en dicha tabla, se concluye que la criba a utilizar es la criba estadística serie IM.

Modelo/Criterios	Capacidad	Facilidad de operación	Dimensiones	Complejidad	Potencia consumida	Total	Evaluación
	3	2	1	3	2	11	73%
	3	1	2	2	2	10	66%
	3	2	2	3	3	13	86%
	3	2	2	3	2	12	80%
	3	1	1	2	2	9	60%

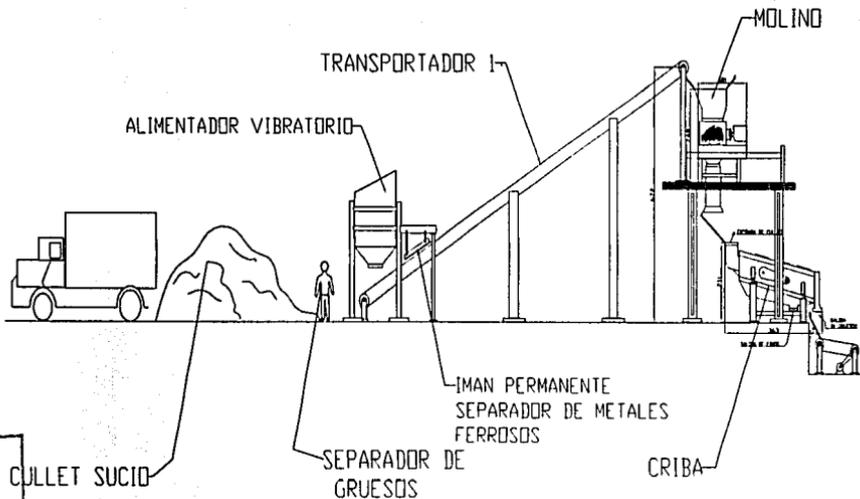
Tabla 5.4 Selección de la criba



TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			
BIAGRAMA INTEGRAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CULLET			
PLANO No. 50	TAB. FIG. No.	NUMERO DE DIBUJO	REV.
Aclaraciones cm.	ESCALA 5:1	MGP	

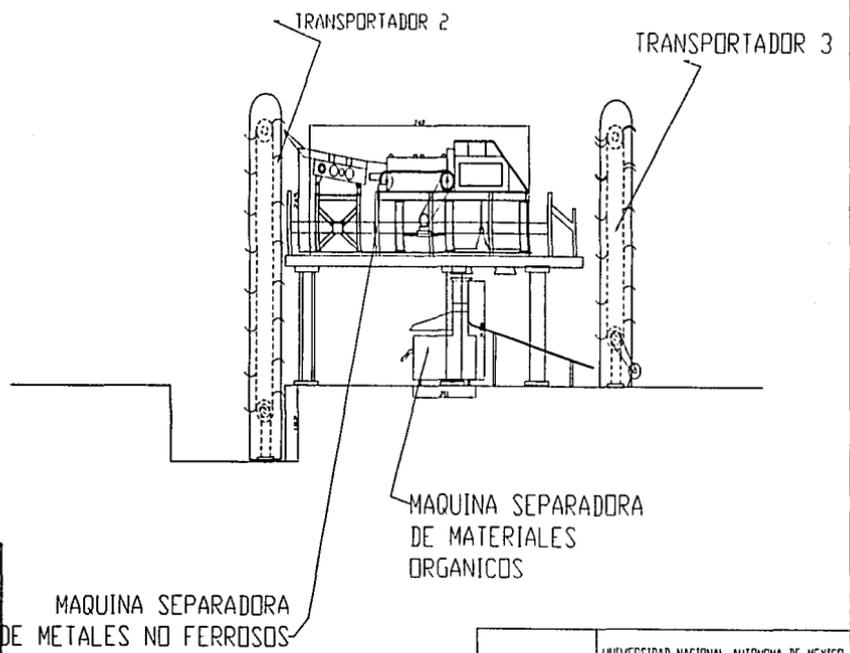
TESIS CON
FALTA DE ORIGEN



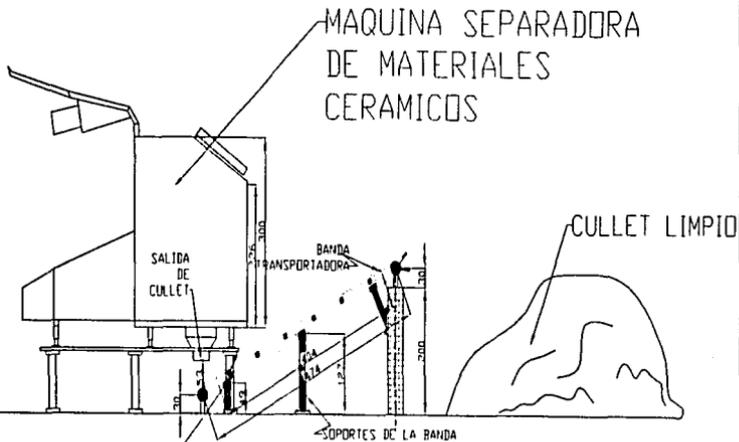
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			
	EQUIPOS DEL PRIMER BIMESTRE DEL PROCESO LAVADO DE CULLET			
PLM N. 5 2011	FAB	ESCALA NO	NUMERO DE DISEÑO	REV
Anotaciones 10	ESCALA S/E			AGDA

5-31-B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			
	EQUIPOS DEL SEGUNDO BLOQUE DEL PROCESO LAVADO DE COQUE			
PROYECTO: S. 33b	FECHA: 1978/07/01	NUMERO DE DISEÑO:	REV.	
Acreditaciones: CM	ESCALA: 5/1		FOYU	



TESIS CON
 PATENTE DE ORIGEN

TRANSPORTADOR 4

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO				
LABORATORIO DE INVESTIGACIONES EN EL PROCESO DE LAVADO DE CULLET				
INVESTIGADOR	FECHA	PERIODO	NUMERO DE DISEÑO	HOJA
Acoteaciones en	ESCALA	5:1		1/1

Con base en la información anterior, en las Figuras (Planos) 5.33, a, b, c se presenta un diagrama de todo el proceso y uno para cada uno de los bloques de equipos que lo integran.

Como se puede observar en los diagramas anteriores, aún es necesario definir y/o diseñar los transportadores-elevadores de cullet necesarios entre cada bloque de equipos del proceso, los mecanismos de interconexión de algunos de los equipos, así como el sistema de lavado.

Transportadores-elevadores de cullet

Conforme a la Figura 5.33, se observa que es necesario seleccionar un transportador de banda (1) que lleve el cullet de entrada a la primera parte del proceso, que es la extracción de metales ferrosos y de ahí a la de molido-cribado, así como otros dos transportadores de cangilones entre los bloques 1 y 2 (2) y 2 y 3 (3) del proceso, así como uno final (4) que lleve el cullet de la salida del separador de materiales cerámicos y refractarios al punto de entrega del cullet, trayecto que se aprovechará para integrar un sistema de lavado.

Transportador de banda (1)

La función de este transportador es recibir el cullet del alimentador vibratorio que se encuentra al inicio del proceso, y llevarlo al primer bloque de equipos: el molino y la criba.

Lo primero que debe determinarse es el tipo de equipo de transporte a instalar. Sobre este particular, es necesario hacer las siguientes consideraciones.

Tipos de equipo existentes. En la actualidad existe una gran diversidad de equipos para transporte de materiales, los más comunes son bandas transportadoras, transportadores de cangilones y transportadores helicoidales (tornillo de Arquímedes).

De los tres tipos señalados, se eligió la banda transportadora debido a las limitantes de operación de los otros dos sistemas, ya que, aunque se trata de sistemas que requieren de un menor espacio de instalación, tienen limitaciones para el manejo del cullet debido a su construcción: ambos se mueven dentro de un ducto con tolerancias relativamente cerradas, en las que pedazos de vidrio de tamaño irregular pueden desgastar, e incluso atorar, el sistema de transporte. Además, el sistema de banda transportadora permite instalar un equipo para la separación de metales ferrosos antes que el material llegue al molino, lo que no puede llevarse a cabo en los otros dos tipos de transportador.

Para seleccionar el transportador de banda (1), lo primero que debe determinarse es el material de la banda; en este caso, se seleccionó hule debido a que permite transportar materiales en planos inclinados reduciendo la posibilidad de deslizamiento del material sobre la banda, además de contar con una resistencia adecuada a la abrasión.

Posteriormente, es necesario determinar el ancho y velocidad de la banda, las cuales se definen en función del volumen de material a transportar. Estas características pueden calcularse a partir de las fórmulas (5.1) y (5.2) siguientes¹:

$$C = Vel \cdot A_n \quad (5.1)$$

$$A_n = h_n(b - 2s) \quad (5.2)$$

Donde:

- A_n = Área nominal de la sección de cullet transportado [pies²]
- C = Capacidad de la banda, [pies³/min]
- Vel = Velocidad de la banda [pies/min]
- h_n = altura nominal del material [pulgadas]
- b = ancho de la banda [pulgadas]
- s = distancia estándar al extremo = $0.055 \times b + 0.9$ [pulgadas]

Ya que estas fórmulas están dadas en función de volúmenes, es necesario estimar el consumo: 5 toneladas/hora en términos de volumen.

Si consideramos que la densidad del cullet es de 2.5 [ton/m³], tenemos que el volumen aproximado de 5 toneladas de éste serán igual a:

$$\bar{c} = \frac{m}{V}$$

Donde:

- \bar{c} = densidad
- m = masa
- V = volumen

Despejando V y sustituyendo valores se tiene:

$$V = \frac{m}{\bar{c}} = \frac{5[\text{ton/hr}]}{2.5[\text{ton/m}^3]} = 2[\text{m}^3/\text{hr}] = 70.63[\text{pies}^3/\text{hr}] = 1.1772[\text{pies}^3/\text{min}]$$

Ahora, se procede a calcular el área del material sobre la banda utilizando la fórmula (5.2) considerando una cama de cullet con una altura de 1 pulgada, lo que permite realizar una extracción eficiente de metales ferrosos sobre la banda; un espesor mayor de la cama dificultaría dicha extracción. Inmediatamente después, utilizando la fórmula (5.1), se calcula la capacidad del transportador. Para este efecto y dado que aún no se selecciona el ancho de la banda, se tabulan los resultados para tres anchos de banda comunes

¹ Conveyor Equipment Manufacturers' (CEMA) handbook E.E.U.U.A.

comercialmente (24, 36 y 48 pulgadas), de donde se elige el más recomendable en función de la velocidad de la banda. Los fabricantes norteamericanos de bandas transportadoras recomiendan una velocidad de alrededor de 10 a 20 pies/min. Los resultados se muestran en la tabla 5.5.

Ancho de banda (pulg.)	s (pulg.)	A_n (pies ²)	C (pies/min)
24	2.22	0.14	8.67
36	2.88	0.21	5.61
48	3.54	0.28	4.14

Tabla 5.5 Dimensiones de la banda transportadora

Se observa que las velocidades resultantes son bajas comparadas con las recomendadas por los fabricantes de bandas transportadoras, por lo que se eligió la banda más angosta (24 pulgadas) que requiere de una mayor velocidad para transportar el material.

Ahora, se procede a calcular la potencia requerida para mover la banda transportadora. Para este efecto, se utiliza la fórmula (5.3) siguiente:

$$P = \frac{T_e \times \text{Vel}}{33,000 \times E} \quad (5.3)$$

donde:

- P = potencia [hp]
- T_e = tensión efectiva [libras]
- Vel = velocidad de la banda [pies/min]
- E = eficiencia del motor

T_e es la tensión efectiva requerida para impulsar la banda en la polea impulsora. Esta tensión efectiva puede expresarse de la siguiente manera²:

$$T_e = T_c + T_x + T_h \quad (5.4)$$

donde:

- T_e = tensión efectiva de la banda [libras]
- T_c = tensión requerida para mover la banda en vacío [libras]
- T_x = tensión requerida para mover la carga horizontalmente [libras]
- T_h = tensión requerida para mover la carga verticalmente [libras]

² Según Rubber & Plastics, Inc. E.E.U.U.A. fabricante de transportadores de banda de hule

A su vez, cada una de las tensiones anteriores está expresada por las siguientes fórmulas:

$$T_c = F_1 \times L \times C_b \quad (5.5)$$

donde:

$F_1 = 0.035$ (factor normal de fricción para mover la banda en vacío)

$L =$ longitud de la banda [pies]

$C_b =$ peso de los componentes de la banda (ver Tabla 5.6)

$$T_x = F_2 \times L \times W_1 \quad (5.6)$$

donde:

$F_2 = 0.04$ (factor de fricción normal para mover carga horizontalmente)

$L =$ longitud de la banda [pies]

$W_1 =$ peso del material [libras/pie]

$$T_h = H \times W_1 \quad (5.7)$$

donde:

$H =$ diferencia de elevación de los extremos del transportador [pies]

Ancho de la banda (pulgadas)	Factor C_b con rodillos de soporte normales de 5 pulgadas (libras/pie)
12	12
18	18
24	24
30	30
36	36
42	42
48	48
54	54
60	60

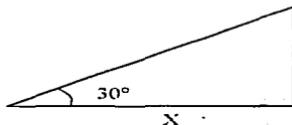
Tabla 5.6 Peso de los componentes móviles de la banda

Nota: Para transportadores de menos de 150 pies de largo se utilizan los siguientes factores:

Longitud en pies	Factor
100 - 150	1.1
75 - 99	1.2
50 - 74	1.3
30 - 49	1.5
15 - 29	3.0

Para calcular la tensión efectiva del transportador (1), se requiere conocer sus dimensiones, las cuales se calculan a continuación:

El transportador (1) tiene que llevar el cullet de un nivel +1.0 m a +6.88 m. Si se consideran las recomendaciones de los fabricantes de transportadores de banda de hule, se tiene que 30° debe ser el ángulo de inclinación máxima de la banda. Con estos datos se puede calcular la longitud de la banda, como se indica a continuación:



$$H = 6.88 - 1 = 5.88 \text{ [m]} \\ = 19.29 \text{ [pies]}$$

$$X = \frac{H}{\tan 30^\circ} = \frac{19.29 \text{ [pies]}}{0.5773} = 33.41 \text{ [pies]}$$

Sólo falta determinar la longitud de la banda (L), esto es:

$$L = \sqrt{H^2 + X^2} = \sqrt{(33.41 \text{ [pies]})^2 + (19.29 \text{ [pies]})^2} = 38.58 \text{ [pies]}$$

Ahora es necesario conocer el peso por pie del material sobre la banda, que es igual al peso específico del volumen de 1 pie de largo por el área nominal de cullet transportado (0.14 pies² para la banda de 24 pulgadas de ancho), como se indica a continuación:

$$\text{Volumen para un pie de largo} = 1 \text{ [pie]} \times 0.14 \text{ [pies}^2\text{]} = 0.14 \text{ [pies}^3\text{]} = 0.0283 \text{ [m}^3\text{]}$$

de donde el peso por pie de material es:

$$W_1 = 0.0283 \text{ [m}^3\text{]} \times 2.5 \text{ [ton/m}^3\text{]} = 0.0099 \text{ [ton]} = 9.9 \text{ [kg]} = 21.78 \text{ [libras]}$$

Ahora, sustituyendo valores en las fórmulas (5.5), (5.6) y (5.7), se tiene:

$$T_1 = 0.035 \times 38.58[\text{pies}] \times 1.5 \times 24[\text{libras / pie}] = 48.62[\text{libras}]$$

$$T_2 = 0.04 \times 38.58[\text{pies}] \times 21.78[\text{libra / pie}] = 33.62[\text{libras}]$$

$$T_3 = 19.29[\text{pies}] \times 21.78[\text{libras / pie}] = 420.136[\text{libras}]$$

Por lo que, sustituyendo valores en (5.4), encontramos la tensión efectiva:

$$T_e = 48.62[\text{libras}] + 33.62[\text{libras}] + 420.136[\text{libras}] = 502.376[\text{libras}]$$

Sustituyendo este valor en la fórmula de la potencia (5.3) y considerando una eficiencia de 0.9 para el motor, se tiene:

$$P = \frac{T_e \times \text{Vel}}{33,000 \times E} = \frac{502.376[\text{libras}] \times 8.67[\text{pies / min}]}{33,000 \times 0.9} = 0.147[\text{hp}]$$

Esto significa que el motor a utilizar debe tener una potencia de 0.147 [hp]; comercialmente se encuentran disponibles motores de ¼ hp. por lo que esta será la potencia del motor que se utilice en el transportador (1).

Transportadores de cangilones (2 y 3)

Los elevadores de cangilones son equipos de uso común en la industria, por lo tanto, existen manuales o catálogos mediante los cuales se puede llevar a cabo la selección de alguno de ellos, de acuerdo a los requerimientos propios de cada proyecto o instalación.

En este caso, se decidió tomar como base el Catálogo 1090 de Martin Sprocket & Gear, Inc.

Para llevar a cabo la selección de los elevadores basándose directamente en las tablas contenidas en este catálogo se requiere conocer:

- **La capacidad volumétrica (o volumen).**- En pies cúbicos por hora. Los elevadores de cangilones deben ser alimentados continua y uniformemente. La capacidad volumétrica utilizada para la selección debe ser la máxima que soporte el elevador.

- **Centros o Elevación.**- En pies.
- **Tamaño y tipo de partícula.**- El tamaño de la partícula es la dimensión de la partícula más grande y el tipo de partículas es el porcentaje que éstas partículas representan del total.
- **Características del material.**- Según la Gráfica de Código de Clasificación de material del catálogo de referencia.
- **Condiciones de operación.**- Las condiciones que afectan la operación incluyen la locación (interior, exterior), el número de horas al día de operación, etc.

Asignando los valores numéricos a los requerimientos anteriores, se tiene:

$$\text{Volumen} = 5 \text{ ton/hr} = 70.63 \text{ pies}^3/\text{hr}$$

$$\text{Elevación} = 7 \text{ m} = 22.97 \text{ pies}$$

$$\text{Tamaño de partícula} = 50 \text{ mm} = 2 \text{ pulgadas}$$

$$\text{Características del material} = \text{granular, flujo promedio, abrasividad extrema.}$$

$$\text{Condiciones de operación} = \text{exterior, 8 horas al día.}$$

Partiendo de estas condiciones, de la tabla H-121 del manual (figura 5.34 en la que se transcribe la parte correspondiente) se recomienda un elevador de banda de la serie B o D, esto es, de banda, de la serie 100 o 200.

Material	Densidad Lb/pie ³	Código de material	Serie de elevadores recomendados
Tierra de Batán, aceitosa	60 – 65	C ½ - 450W	B, D
Vidrio, tonda (lote)	80 – 100	C ½ - 37	B, D
Granito, fino	80 – 90	C ½ - 27	F

Figura 5.34 Recomendación de transportadores para diferentes materiales

Tomando en cuenta la capacidad volumétrica y el tamaño de la partícula, en la tabla H-124 (Figura 5.35 en la siguiente página, en la que se transcribe la parte correspondiente) se determina que el elevador requerido es el modelo B147-148.

Capacidad

No. de Elevador	No. de Cangilones	Cargos			Cargos			Cargos			Cargos			No. de Elevador
		100%	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%	
B127-148	1000	145	10	15	25	10	5	10	10	20	25	15	10	B127-148
B127-148	1000	145	10	15	25	10	5	10	10	20	25	15	10	B127-148

Figura 5.35 Selección de transportador en función de capacidad y tamaño de partícula

Ahora bien, considerando la elevación, la densidad del material y el modelo de elevador requerido, en la tabla H-125 (Figura 5.36 cuya parte correspondiente también se transcribe) se determina que es necesario un motor de 7.5 HP y un diámetro de eje en la cabeza de 2-15/16".

Caballos de fuerza*

No. de Elevador	Cargos Por Seg.	Diámetro de Eje de Cabeza	Cargos			Cargos			Cargos			No. de Elevador		
			100%	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%			
B127-148	1000	2-15/16"	35	10	15	25	10	5	10	10	20	25	15	B127-148
B127-148	1000	2-15/16"	35	10	15	25	10	5	10	10	20	25	15	B127-148

* Basado en un cangilón lleno al 100%.

Figura 5.36 Selección de la potencia del transportador

Resumiendo, se requieren dos elevadores de cangilones del siguiente tipo:

Marca: Martin Sprocket & Gear, Inc.
 Modelo: Elevador de banda B147-148
 Motor: 7.5 HP
 Eje motriz: 2-15/16"

Cuyas dimensiones generales (en pulgadas) son las que se señalan en la siguiente tabla y que corresponden a las mostradas en la Figura 5.37 en la siguiente página.

Carcaza:

A	B
19-3/4	48

Bota

F	G	H	J	K	L	M	N	P
19	10	40-1/2	60	72	24	21	23-1/2	15

Cabeza

R	S	T	U	V	Y	Z	D-1
35-3/4	13	36-1/2	48	27-1/2	24	40-5/8	19



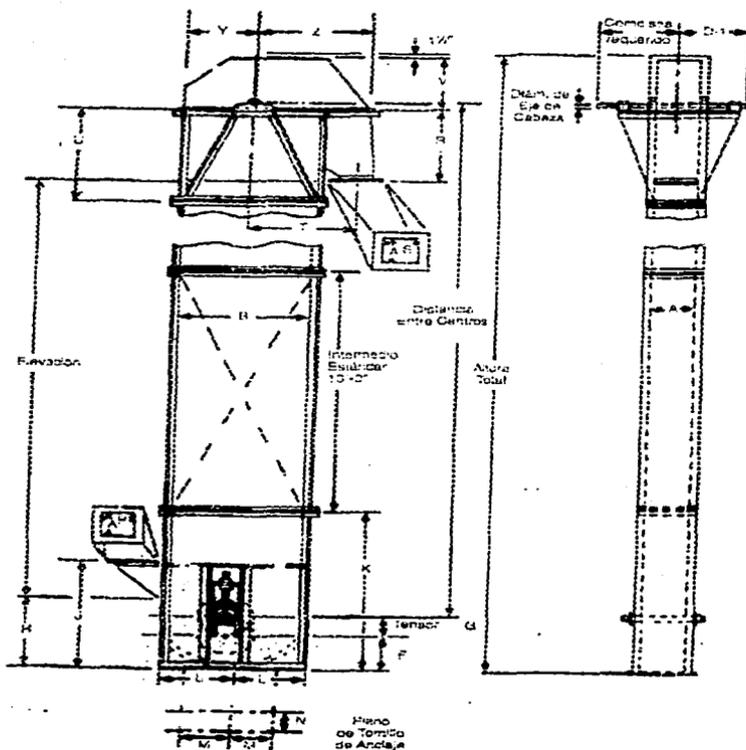


Figura 5.37 Dimensiones de los elevadores de cangilones (3 y 4)

Transportador-elevador de salida (4)

Dado que en esta última parte del proceso se incluirá el sistema de lavado de cullet, el diseño de este transportador se llevará a cabo conjuntamente con el sistema de lavado en la siguiente Sección.

Dispositivos de conexión entre equipos

Como se observa en la Figura 5.33 (diagrama general del proceso), se requiere de dispositivos que lleven el cullet que sale de un equipo dado (molino, criba, etc.), al siguiente equipo en la línea del proceso. Por lo general, este tipo de dispositivos es muy simple y consisten básicamente en ductos de diferentes secciones (rectangulares principalmente), que canalizan el material de la salida de un equipo a la entrada del siguiente.

Para efectos de este trabajo, este tipo de dispositivos no se aborda, ya que además, en la práctica, se construyen en el Sitio de instalación de los sistemas, teniendo en cuenta todos los elementos que se presentan en campo al momento del montaje.

Estructuras de soporte del molino y del separador de metales no ferrosos

A partir de la distribución propuesta de los equipos (Figura 5.33), se observa que la etapa de molido y separación de metales no ferrosos presenta una elevación respecto del nivel en el cual se encuentran los demás equipos. Para conseguir esta elevación, es necesario construir de una estructura que además de soportar el peso del equipo, no interfiera con el desarrollo del proceso y facilite el movimiento de los operarios y encargados de mantenimiento. La implementación de una estructura de tales características requiere de una metodología bien establecida compuesta de los siguientes pasos: planeación, análisis, diseño y construcción..

- **Planeación.** Consiste en seleccionar una forma estructural que sea segura, estética y económica.
- **Análisis.** Se realizan idealizaciones sobre cómo están soportados y conectados los miembros entre sí. Se especifican las cargas. Se calculan las fuerzas en los miembros (cargas internas) y sus desplazamientos utilizando la mecánica estructural.
- **Diseño.** El tamaño de los miembros se determina de manera que satisfaga los criterios de resistencia, estabilidad y deflexión, como está asentado en las normas y códigos en vigor.

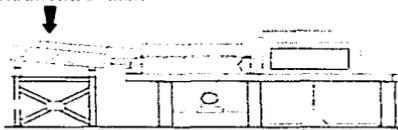
- **Construcción.** Se refiere a planear las actividades que implica el montaje real de la estructura.

Para la creación de una estructura que cumpla con una función específica de uso industrial se requiere un equipo multidisciplinario que haga uso de las diferentes técnicas de ingeniería civil y arquitectura para llevar a cabo los pasos antes citados.

A continuación se propone una forma estructural para cada uno de los equipos que lo requieran con el sólo fin de visualizar el estado final del conjunto de equipos.

Para determinar la forma estructural básica, es necesario conocer los requerimientos relativos al equipo: dimensiones y peso; y los requerimientos de proceso: entrada y salida de material; tal como se observa en la Figura 5.38 para el equipo de separación de metales no ferrosos.

ENTRADA DE CULLETA



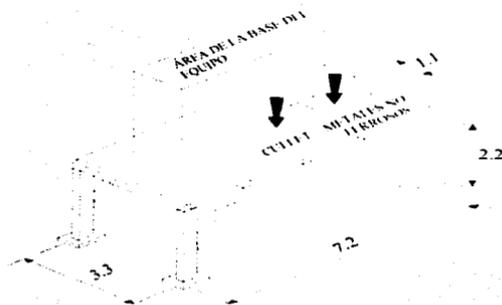
SALIDA DE CULLETA

SALIDA DE METALES
NO FERROSOS

Peso: 3175 kg
Dimensiones totales
(largo x ancho x alto) :
5.7 x 1.9 x 2 m
Dimensiones de la base del
equipo (largo x ancho) :
5.7 x 1.4 m

Figura 5.38 Equipo de separación de metales no ferrosos

En la Figura 5.39 se muestra un ejemplo de una estructura adaptada a las condiciones reales de salida del material, así como la superficie ocupada por el equipo. Las dimensiones asignadas a la estructura son sólo ilustrativas y tienen el fin de proporcionar una idea de la magnitud que tendría la estructura real.



Acotaciones en metros

Figura 5.39 Estructura para soportar el equipo de separación de metales no ferrosos

Para la estructura que soportará el molino se desarrollan las mismas ideas en las Figuras 5.40 y 5.41 siguientes.

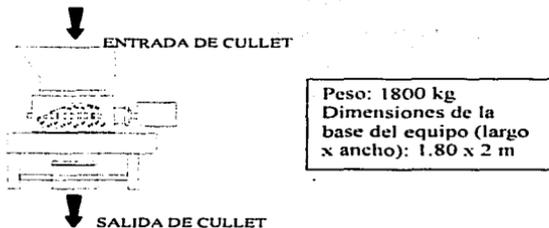
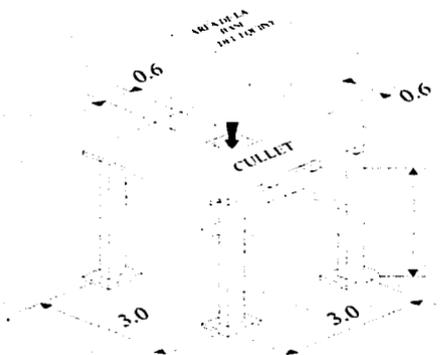


Figura 5.40 Molino de cullet



Acotaciones en metros

Figura 5.41 Estructura para el molino de cullet.

Las estructuras planteadas anteriormente están formadas por los elementos mostrados en la Figura 5.42; la carga se transmite desde la superficie de apoyo hacia las vigas y de ahí a los marcos, para finalmente llegar a los cimientos. La existencia y magnitud de los esfuerzos y momentos internos de la estructura serán fuertemente influenciados por el tipo de unión elegido entre los elementos; después de hacer esta elección y de definir el material más adecuado de construcción, se pueden calcular las dimensiones de los elementos estructurales necesarios.

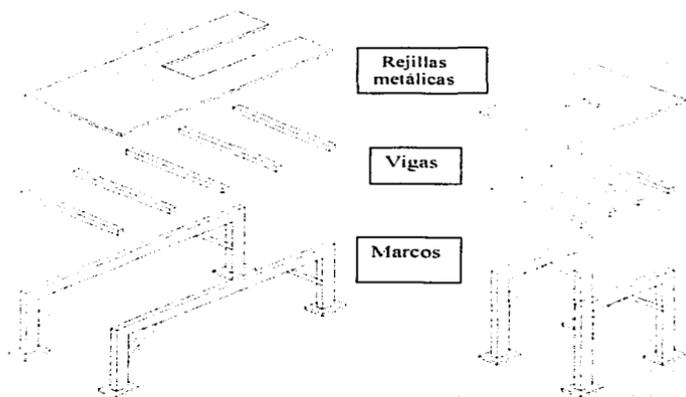


Figura 5.42 Elementos que conforman las estructuras ilustradas.

Suponiendo que la elección del material sea perfil estructural de acero y con base en las dimensiones mostradas en la figuras 5.41 y 5.42, la cantidad de material requerido para las dos estructuras sería: 80 m de perfil y 35 m² de rejillas metálicas, esto sin contar elementos tales como las escaleras de acceso y barandales de protección, los cuales deben respetar los códigos de seguridad y construcción vigentes.

Como se mencionó al inicio de esta sección, la ilustración de las estructuras hecha anteriormente brinda una idea de la magnitud física y de los recursos necesarios para la implementación de las mismas en el proceso de limpieza del cullet, y no se abundará más en aspectos que no son objeto ni meta del trabajo de tesis presentado.

5.3 Sistema de lavado de cullet

Utilizando el diagrama de flujo del sistema de limpieza de cullet (Figura 5.33), se podrá observar que el lavado del cullet se instalará en la parte final del proceso, pero antes se tendrá que definir el medio de transporte del mismo, para ser almacenado ya sin ningún contaminante.

Para seleccionar el transportador más adecuado, se considerará la forma en la que el cullet es entregado por la máquina separadora de contaminantes cerámicos, es decir, que la salida del cullet es inferior, por lo que primero se tendrá que realizar un análisis de los elementos o equipo que entregará el cullet desde la máquina al medio de transporte, para después diseñar el sistema de lavado.

5.3.1 Diseño del medio de transporte para cullet última etapa

En la figura 5.43, se muestran las dimensiones de la máquina para separar contaminantes cerámicos y en la figura 5.44 las distancias que tendría que recorrer el cullet desde el separador de cerámicos hasta el punto donde se almacenará.

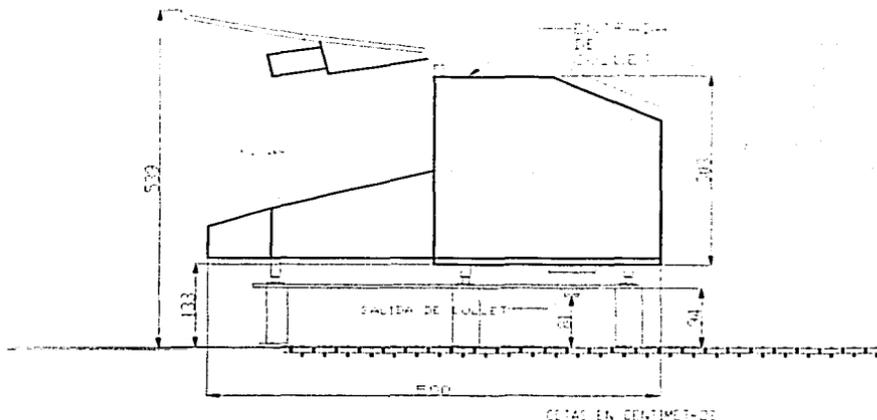


Figura 5.43 Máquina separadora de contaminantes cerámicos

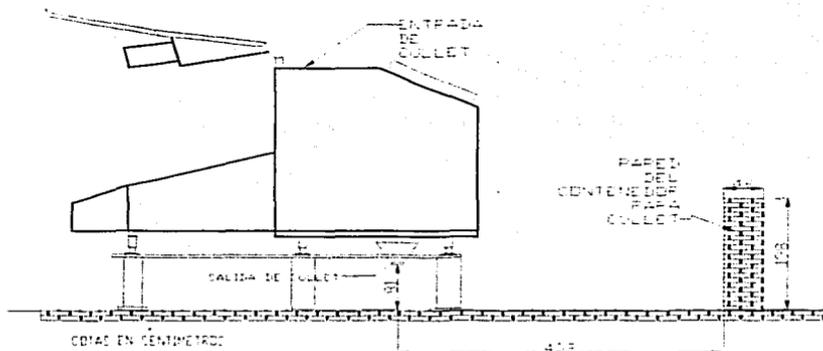


Figura 5.44 Distancias entre el separador de cerámicos y el punto de entrega del cullet limpio

Al observar las distancias mencionadas y las dimensiones de la salida del cullet del separador de cerámicos, se nota que no se puede instalar un transportador de cangilones como se ha estado haciendo para transportar el cullet de una máquina a otra, ya que no se tiene que elevar para ser depositado en el punto de entrega, además que en este espacio tendrá que instalarse el lavador de cullet.

Por lo anterior, primero se determinará que tipo de transportador se puede utilizar, mediante un análisis, tal y como se realizó para seleccionar el equipo mas adecuado para separar los contaminantes del cullet.

En la tabla 5.7 se muestran las características de los transportadores que se podrían utilizar para materiales abrasivos como el vidrio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

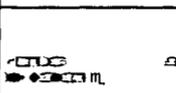
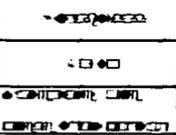
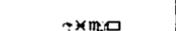
TIPO DE TRANSPORTADOR		
 <p>CARACTERÍSTICAS</p>		
		<p>Requiere de varios mecanismos que hacen compleja su instalación, además de que se requiere diseñar los racks o dispositivos que transportan la carga, para acoplarse a esta.</p>
	<p>Dependiendo del material con el que se fabrica puede durar hasta 30 años. Relativamente caro por la estructura que utiliza y el diseño de los racks (entre 300.000.000 M.N. y 500.000.000 M.N.).</p>	<p>Dependiendo del material de la banda puede durar de 5 a 10 años. Dependiendo de la distancia de la banda, no es caro, alrededor de 100.000 M.N. hasta 250.000 M.N. Cualquier tipo de material.</p>
	<p>De todos tipos dependiendo del diseño del rack o dispositivo que transporta el material.</p>	<p>Es estable, siempre y cuando este nivelado y alineado en sus partes móviles.</p>
	<p>Es estable, siempre y cuando este nivelado y alineado en sus partes móviles.</p>	<p>Es estable, siempre y cuando este nivelado y alineado en sus partes móviles.</p>
	<p>Su desempeño es bueno, cuando el diseño del rack o canastilla de transporte es funcional para la carga a mover.</p>	<p>Debido al diseño de la banda, es funcional para transportar desde materiales sólidos hasta en combinación con líquidos, sin tener que diseñar ningún tipo de rack o canastilla.</p>
	<p>Su diseño es complicado, ya que incluye diversos mecanismos y además se tiene que diseñar el sistema de descarga, racks o dispositivos que contiene o transporta la carga.</p>	<p>El diseño de la banda es sencillo y además la banda puede ser acoplable, al lugar donde se va a almacenar la carga, sin tener que diseñar dispositivos o mecanismos complicados.</p>

Tabla 5.7 Características de transportadores

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Especificaciones de diseño del transportador

En la tabla 5.8 se muestran las especificaciones de selección y diseño del transportador para cullet.

TRANSPORTE DE CULLET		
ESPECIFICACIONES	REQUERIDO	DESEADO
✓ Parámetros Transportar 5.000 Kg de vidrio sin contaminantes.	X	
✓ Tamaño de cullet a transportar Mínimo hasta 9.5 mm de diversas formas	X	
✓ Material del transportador: Resistente al agua y a la abrasión	X	
✓ Dimensión del transportador: Se menciona en la figura 5.41	X	
✓ Operación Semi - automática. Con un solo operario Mantenimiento preventivo cada seis meses.		X
✓ Materiales y refacciones: Para el equipo nacional los materiales o refacciones requeridos deberán ser de fácil adquisición. En cuanto a equipos comprados fuera de México, se deberá tener un lote de refacciones para su fácil mantenimiento.		X

Tabla 5.8 Especificaciones para selección y diseño del transportador

Selección del transportador

Para seleccionar el transportador adecuado, se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

✓ Facilidad de operación

Uno de los parámetros a seguir mencionados en la tabla 5.3, en cuanto a operación del equipo es que nada más se requiere un operario, por lo que tiene que ser semiautomático; lo que el transportador será accionado por el operario.

3 = No se requiere operario

2 = Por lo menos se requiere un operario

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1 = Se requieren más de dos operarios

✓ Fácil mantenimiento

Se refiere a que no se tenga que estar limpiando constantemente o cambiando partes internas o que se obstruya. Para evaluar este criterio se tienen las siguientes calificaciones.

3 = Fácil mantenimiento, montaje y desmontaje de partes que lo conforman.

2 = Fácil montaje y desmontaje de partes internas, pero de difícil mantenimiento

1 = Dificultad de acceder al lugar de su instalación y difícil de desmontar.

✓ Volumen ocupado (de acuerdo a la carga a manejar)

No se debe ocupar un mayor espacio al requerido por la carga de cullet, debido a que el espacio donde se va a confinar no es muy amplio. Además tiene que cumplir con la facilidad para ser ensamblado en conjunto con otros equipos de proceso.

3 = El equipo puede ser acoplado al proceso y fácil ensamble con otros equipos.

2 = El equipo puede ser acoplado al proceso, pero no se puede ensamblar con otros equipos

1 = No se acopla al proceso y además no se ensambla con ningún otro equipo

✓ Simplicidad de forma y partes

En este concepto se involucra el tipo banda o bandeja que podemos utilizar para simplificar su mantenimiento, instalación y obtención de partes de reemplazo o refacciones.

3 = Simpleza en forma, fácil de conseguir partes de reemplazo.

2 = Simpleza en forma, pero difícil de conseguir refacciones.

1 = Forma confusa y difícil de conseguir refacciones.

✓ Costo

Deberá ser bajo con la finalidad de reducir el costo total del proceso, pero también se debe involucrar el costo de mantenimiento que sea bajo y el de refaccionamiento. Si se pueden eliminar los costos por refaccionamiento y mantenimiento sería la mejor opción.

3 = Costo entre \$50,000.00 y \$120,000.00 M.N.

2 = Costo entre \$121,000.00 y \$200,000.00 M.N.

1 = Costo entre \$201,000.00 y \$300,000.00 M.N.

✓ **Eficiencia en cuanto a funcionalidad**

El equipo deberá de transportar el 100% de la carga en el tiempo indicado y además debe de ser compatible con el sistema de lavado (resistente al agua).

- 3 = Transporta el 100% de cullet, resistente al agua y puede ser acoplado a otro equipo de proceso.
- 2 = Transporta de un 80% a un 60%, ya que el transportador no es estable.
- 1 = Transporta menos del 50%, ya que el material lo va tirando

✓ **Durabilidad**

Se refiere a que el equipo tendrá que ser durable hasta el tiempo especificado, tanto por la planta de vidrio flotado como por el proveedor del equipo, con la finalidad de no cambiar tan seguido este equipo.

- 3 = Cinco a diez años reales, considerando que se maneja un material abrasivo y desgastante para este equipo.
- 2 = Entre tres y cinco años considerando el material abrasivo
- 1 = Menos de tres años, considerando que se maneja un material abrasivo.

✓ **Confiabilidad**

En este criterio se calificará la certidumbre en cuanto a estabilidad de funcionamiento y de seguridad de estos equipos, ya que al ser operados por una persona, no debe presentar problemas de inseguridad hacia el personal u operario y además no debe parar o entorpecer el proceso de limpieza.

- 3 = Estable y sin ningún riesgo de inseguridad
- 2 = Semi-estable (considerando que tiene partes móviles) y con cierto riesgo de inseguridad
- 1 = Inestable y con alto porcentaje de inseguridad en su funcionamiento.

En la tabla 5.9 se califica cada transportador conforme a los criterios mencionados

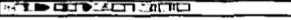
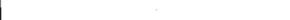
CRITERIOS	TIPO DE TRANSPORTADOR		IDEAL
			
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			1
CONSTRUCCIÓN			24

Tabla 5.9 Selección del transportador.

Como se puede apreciar en la tabla 5.9, el que obtiene una mejor calificación es la banda transportadora, tomando en cuenta que es la que se acopla más fácilmente al proceso. Ahora lo que se tendrá que hacer, es diseñar el tipo de banda a utilizar, con la finalidad de acoplar el sistema de lavado a ésta.

Diseño de la banda transportadora

En la figura 5.44 se observa la distancia existente entre la máquina separadora de cerámicos y el lugar donde se va a almacenar el cullet limpio, con estas dimensiones se puede diseñar la tensión y el ángulo que debe tener la banda para sobrepasar la pared del contenedor, para después dejarlo caer por gravedad a una placa que permitirá deslizar el cullet y depositarlo en el punto de almacenamiento.

Además, se debe tener en cuenta que se va a utilizar agua para el lavado, la banda no debe tirar el cullet; es decir que debe tener algún dispositivo para evitar que el cullet se salga por los lados. También se debe considerar que el vidrio es abrasivo, por lo que la banda puede ser de malla metálica resistente a la abrasión, resistente al agua y que además permita eliminar el polvo o los residuos obtenidos del lavado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De lo anterior se tienen los siguientes datos:

- ✓ Carga de cullet a transportar: 5 ton/hr
- ✓ Longitud del transportador: 4.74 m
- ✓ Elevación del transportador: 1.98 m

Para el diseño y selección de la banda transportadora, se requiere la siguiente información:

- 1.- Tensión total de la banda
- 2.- Tensión total de trabajo
- 3.- Contra tensión (evita el deslizamiento de la banda)

Para obtener esta información, se utiliza la fórmula (5.8) para la tensión efectiva de la banda¹:

$$T_e = (fL - H)W_b + (fL + H) \times (W_b + W_L) \quad (5.8)$$

Donde: T_e = Tensión de la banda

H = Elevación de la banda

L = Longitud de la banda

W_b = Peso de la banda [libras/pie]

W_L = Peso de la carga [libras/pie]

f = factor de fricción

En la figura 5.45 se muestra un esquema en el que se consideran las distancias de H y L .

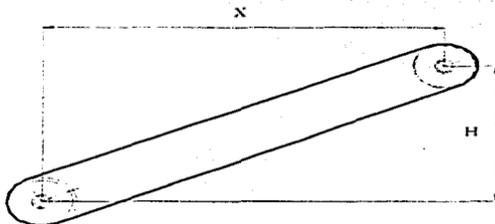
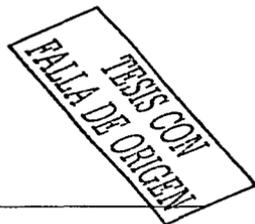


Figura 5.45 Esquema de la banda

¹ CEMA - Conveyor Equipment Manufacturers' (CEMA) handbook E. E. U. U. A.



En primer lugar, es necesario conocer las dimensiones X y H, para esto nos referimos a la Figura 5.44 en el cual se muestra la distancia entre el piso y la descarga del separador de cerámicos, como se observa, la distancia es de 0.81 m, pero se debe adaptar una lámina o placa para que el cullet sea suministrado al transportador.

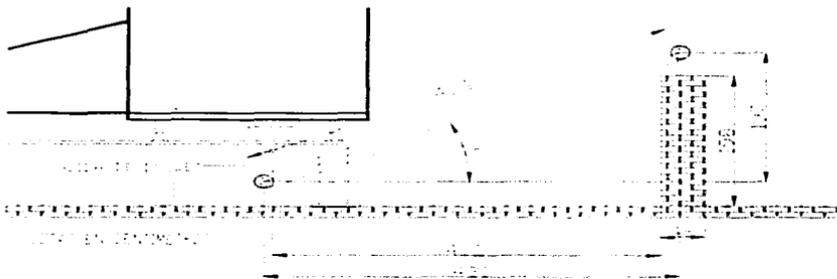


Figura 5.46 Dimensiones de la banda transportadora

Ahora, para obtener el peso de la banda, primero es necesario seleccionar el tipo de banda.

Por las características geométricas del material a transportar y por las condiciones de abrasividad del mismo, se selecciona la malla "GRATEX" G-43-30-10-12, cuyas características son las siguientes:

(M) Tensión máxima de trabajo = 3,385 lb/pie por pie de ancho de banda
 Peso = 6.75 lb/pie²

En la Figura 5.47 se muestra la malla señalada.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

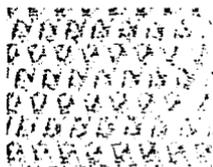


Figura 5.47 Malla de acero para el transportador de cullet

Estableciendo un ancho de banda de 2 pies y proponiendo una altura de cama de material (cullet) sobre la banda de 1 pulgada se tiene

$$W_1 = 26.09 \text{ [libras/pie]}$$

$$W_b = 2 \times 6.75 = 13.50 \text{ [libras/pie]}$$

Ahora es necesario seleccionar un coeficiente de fricción, para lo cual se utiliza la Tabla 5.10 que se muestra a continuación:

Tipo de soporte	Coefficiente de fricción
Cojinetes de bolas	0.05
Cojinetes de rodillos	0.10
Cama de lámina de plástico lubricada	0.10
Cama de lámina de plástico sin lubricar	0.17
Cama de lámina de acero lubricada	0.25
Cama de lámina de acero sin lubricar	0.35

Tabla 5.10 Coeficientes de fricción

Para el caso en estudio, el coeficiente de fricción sería igual a 0.35, dado que se trata de un transportador con transmisión de potencia por fricción.

Con esto se tienen los siguientes valores:

$$f = 0.35$$

$$L = 14.1 \text{ [pies]}$$

$$H = 6.46 \text{ [pies]}$$

$$W_b = 13.50 \text{ [libras/pie]}$$

$$W_t = 26.09 \text{ [libras/pie]}$$

Ya que el término $(fL \cdot V)$ se vuelve negativo y por lo tanto puede eliminarse, se tiene que la fórmula (5.8) se reduce a:

$$T_e = (fL + H) (W_b + W_t) \quad (5.9)$$

Sustituyendo valores:

$$T_e = (0.35 \cdot 14 \text{ [pies]} + 6.46 \text{ [pies]}) \cdot (13.50 \text{ [libras / pie]} + 26.09 \text{ [libras / pie]}) = 450.93 \text{ [libras]}$$

Ahora, para calcular la potencia del motor requerida para impulsar el transportador, es necesario obtener la velocidad a la que se desplazará el mismo.

Cálculo de la velocidad

$$m = V \times A \times \rho \quad (5.10)$$

Donde:

- m = gasto másico
- V = velocidad
- A = área de la sección
- ρ = densidad del material

Despejando la velocidad, se obtiene

$$V = \frac{m}{\rho A} \quad (5.11)$$

donde

$$m = 5,000 \text{ [kg/hr]} = 183.33 \text{ [libras/min]}$$

$$A = 0.1245 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\rho = 2,500 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 155.89 \text{ [libras/pie}^3\text{]}$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$V = \frac{183.33 \text{ [libras / min]}}{155.89 \text{ [libras / pie}^3\text{]} \times 0.1245 \text{ [libras / pie}^2\text{]}} = 9.44 \text{ [pies / min]}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ahora se utiliza la fórmula 5.12 para efectuar el cálculo de la potencia en Hp.

$$P = \frac{T_c V e U}{33,000 \times E} \quad (5.12)$$

Donde:

- $T_c = 450.93$ libras
- $V = 9.44$ [pies/min]
- $U =$ Factor de uso (comúnmente recomendado 3)
- $E =$ Eficiencia del motor 90%

Esta fórmula difiere de la (5.3) utilizada para calcular la potencia del transportador (1) en que se agrega un factor U (del usuario) considerado para las bandas metálicas por fricción.

Sustituyendo valores

$$P = \frac{450.93[\text{libras}] \cdot 9.44[\text{pies / min}] \cdot 3}{33,000 \cdot 0.9} = 0.430[\text{hp}]$$

Por lo tanto, en función de la disponibilidad de equipos comerciales, se requiere de un motor eléctrico de $\frac{1}{2}$ hp.

Dimensiones generales de la banda transportadora y selección de materiales para su fabricación.

Las dimensiones generales de la banda transportadora se muestran en la figura 5.46, por lo que se refiere a la selección de los materiales adecuados para su fabricación, se tendría que considerar lo siguiente:

1. El transportador, va estar a la intemperie.
2. Al acoplarse el sistema de lavado al transportador, se debe considerar que los materiales tienen que ser resistentes a la corrosión del agua.
3. La estructura o soportes del transportador, no tienen contacto con el agua, por lo que solamente deberán ser resistentes a la corrosión del medio ambiente o recubiertos con alguna pintura anticorrosiva.

En la misma Figura 5.46, se muestra la distancia que debe tener entre centros la banda transportadora, pero como esta banda se encuentra con un ángulo de 25° , se tendrán que diseñar los soportes que debe tener para que ésta no se pandee, de acuerdo al manual de bandas transportadoras⁴, se requieren unos cilindros denominados rodillos guías, los cuales permitirán que la banda no se flexione a la mitad de la distancia, el manual nos

⁴ Cambridge Wire Cloth Co. E. E. U. U. A.

indica la distancia que debe existir entre cada rodillo guía, así como el tipo de soporte que debe instalarse para que resista el peso, tanto de los rodillos como de la banda.

En la figura 5.48 se muestra un esquema de las dimensiones que deben tener los rodillos guía y los soportes.

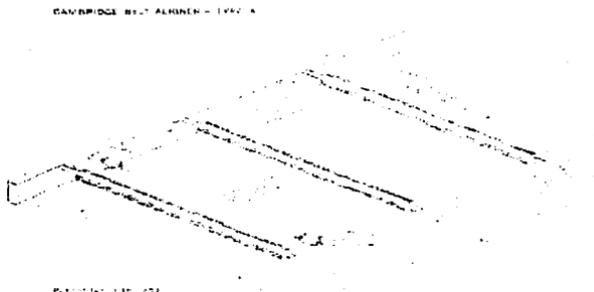
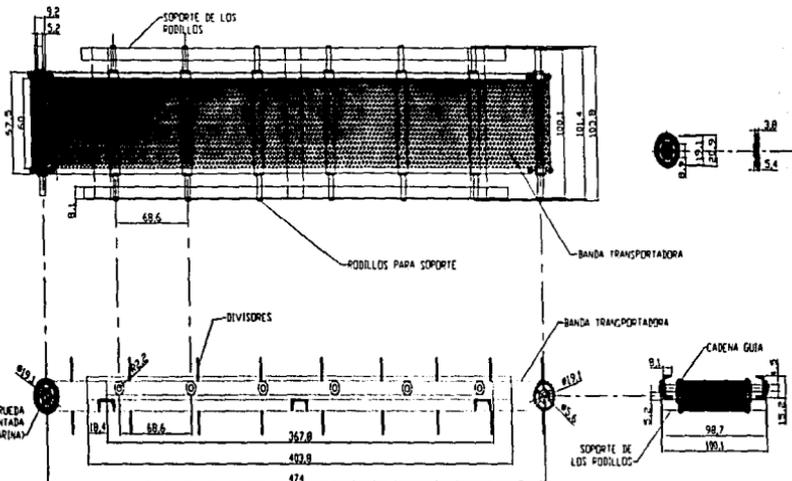


Figura 5.48 Dimensiones de los rodillos

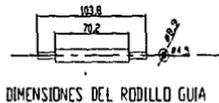
En la figura 5.48 se observa que los soportes son vigas en "U" y el diámetro de los rodillos guía es de 3.5" (8.9 cm); con estos datos aplicados al diseño de la banda, se obtienen las dimensiones de lo que se llamará "sistema de rodillos guía". Las dimensiones de este sistema se muestran en la Figura (plano) 5.49 "Arreglo General del Transportador (4)". En este mismo plano se muestran las dimensiones de los soportes seleccionados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

DIMENSIONES DEL
 ANGAJO QUE SOPORTA
 LOS RODILLOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO				
				ARREGLO DE NEVAL DE LA BANDA TRANSPORTADORA No.2
PLANO No	TAM	FECH NO	NUMERO DE DIBUJO	REV
Acoladores		ESCALA 1:54		1/4

5-68-A

5.3.2 Diseño del sistema de lavado de cullet

Generación del concepto

El proceso de lavado de cullet se incorporó al proceso general de eliminación de contaminantes debido a que al vidrio se le puede adherir polvo o algunos otros materiales que se pueden eliminar por medio de un lavado con agua.

La caja negra de diseño del sistema de lavado se muestra en la Figura 5.50:



Figura 5.50 Caja negra para el diseño del sistema de lavado

A continuación se muestran algunas ideas o conceptos para el lavado de cullet, considerando su adaptación al transportador de banda, tal y como se mencionó anteriormente.

Concepto 1

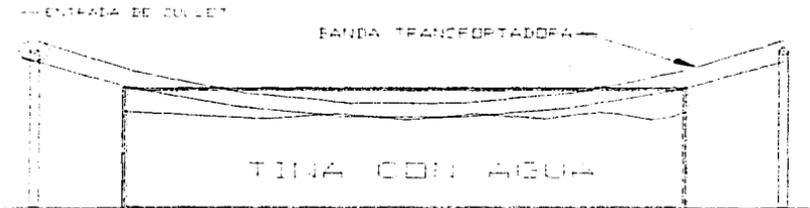


Figura 5.51 Esquema del concepto 1 del sistema para lavado de cullet

Como se muestra en la figura 5.51, este concepto consta de una tina con agua, donde se sumerge la banda que transporta el cullet, por cuya acción se lavaría el cullet. El sistema consta de una tina con drenado, sin ningún tipo de filtrado o equipo que permita sacar constantemente el polvo o partículas que queden almacenados en la tina. Además, este

sistema no tiene ningún control en cuanto a si permanecen partículas de cullet dentro de la tina.

El diseño de la tina tendría que ser tan grande como la banda, además que se tendría que diseñar una nueva banda, debido a que la que se planteó como la mejor opción, está en ángulo. El mantenimiento de ésta sería el mínimo, ya que no contiene partes o equipos adicionales a la tina, más que una válvula para el drenado del agua.

Concepto 2

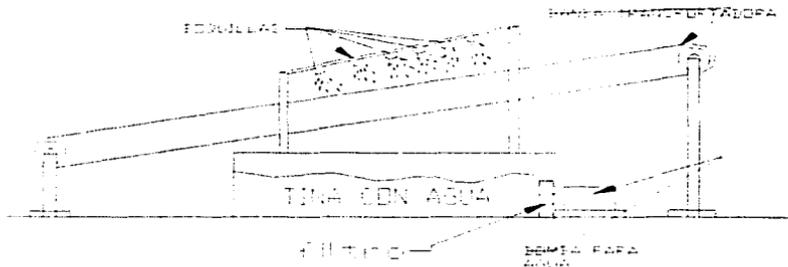


Figura 5.52 Esquema del concepto 2 del sistema de lavado de cullet

El concepto mostrado en la figura 5.52 consta de una tina con agua, boquillas que permiten lanzar chorros de agua al cullet que va pasando en el transportador, además que el ángulo en que éstas expulsan el agua puede abarcar el ancho de la banda, lo que lo hace eficiente. Consta también de un sistema de bombeo y filtrado para eliminar el polvo o partículas que puedan tapan u obstruir la salida del agua en las boquillas.

El volumen ocupado por la tina sería alrededor de 3,5 a 4 m³ y utilizaría de 30 a 100 litros por hora de agua, dependiendo del número de boquillas, diámetro y consumo de agua por minuto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Concepto 3

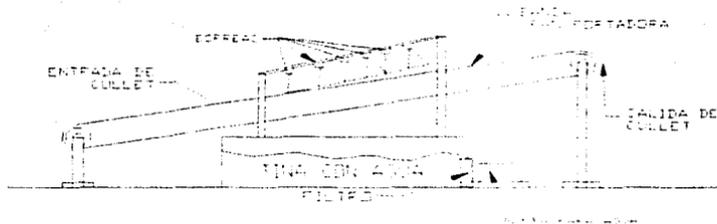


Figura 5.53 Esquema del concepto 3 del sistema para lavado de cullet

Este concepto es similar al anterior, con la diferencia que en este se utilizan espresas y la existencia comercial de diversos tipos de espresas, hace que el sistema sea aún más eficiente, ya que colocando el mínimo de espresas, con menor diámetro que las boquillas, el agua puede abarcar un área mayor de la banda y mejorar el lavado del cullet, disminuyendo el consumo de agua. Este sistema consta de una bomba para impulsar el agua y filtros para evitar que se obstruyan las espresas; aunque existen espresas autolimpiables.

La tina podría ser de 1 a 3 m³, lo que hace que el sistema ocupe un menor volumen.

Concepto 4

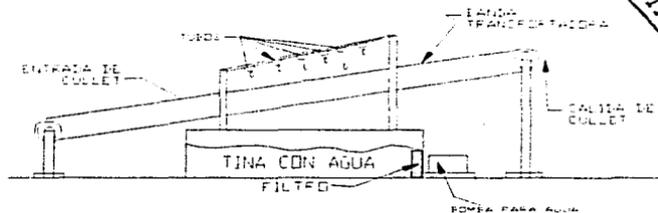


Figura 5.54 Esquema del concepto 4 del sistema para lavado de cullet

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Este concepto mostrado en la figura 5.51 es similar a los dos anteriores, pero ahora se le han colocado tubos que se fabricarían con orificios para que el agua sea espreada. Debido al diseño de los orificios, el área en la que se esprea el agua no podría ser grande, por lo que se deberían utilizar varios tubos. Este diseño no es muy controlable en cuanto al consumo de agua, además que es fácil que se obstruyan los orificios.

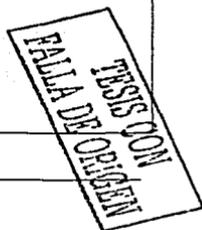
Como se observa, se tienen cuatro conceptos de diseño del sistema de lavado, ahora lo que se tiene que hacer es seleccionar el más adecuado por medio de criterios, tal y como se hizo con el sistema de transporte.

Selección del método para el lavado de cullet

En la tabla 5.11 se muestran las especificaciones que deben tenerse en cuenta para seleccionar el método mas adecuado para el lavado de cullet.

LAVADO DE CULLET		
ESPECIFICACIONES	REQUERIDO	DESEADO
✓ Parámetros Lavar 5,000 kg/hr de cullet.	X	
✓ Tamaño de cullet a lavar Mínimo 9.5 mm de diversas formas	X	
✓ Material del sistema de lavado: Resistente al agua y a la abrasión y la corrosión	X	
✓ Dimensiones del sistema Se debe de acoplar a las dimensiones de la banda transportadora, sin interrumpir el movimiento de ésta.		X
✓ Operación Semi - automática. Con un solo operario Mantenimiento preventivo cada seis meses.	X	
✓ Materiales y refacciones: Para el equipo nacional, los materiales o refacciones requeridos deberán ser de fácil adquisición. En cuanto a equipos comprados fuera de México, se deberá tener un lote de refacciones para su fácil mantenimiento.	X	

Tabla 5.11 Especificaciones del sistema de lavado de cullet



De acuerdo a las especificaciones del proceso de lavado, se determinarán los criterios adecuados para seleccionar el método.

Criterios para selección del concepto o método del sistema de lavado

Los siguientes criterios serán utilizados para calificar los conceptos mencionados en la tabla 5.11.

✓ Eficiencia

Se refiere a que toda la carga de cullet será lavada, sea cualquier forma o posición de este sobre la banda transportadora, por lo que el sistema debe abarcar el ancho de la banda transportadora.

- 3 = Lava el 100% del cullet y abarca el ancho de la banda transportadora
- 2 = Lava del 50% al 80% del cullet y ocupa el ancho de la banda
- 1 = Lava menos del 50% y no ocupa el ancho de la banda

✓ Mantenimiento

Deberá ser el mínimo requerido por el sistema, además que el operario o personal de mantenimiento, no deberá parar el sistema para dar mantenimiento correctivo a cualquiera de sus partes en menos de seis meses, según lo establecido en las especificaciones de diseño.

- 3 = Requiere mantenimiento y limpieza, hasta los seis meses
- 2 = Requiere mantenimiento y limpieza mínimo cada tres meses
- 1 = Requiere mantenimiento y limpieza constantemente.

✓ Facilidad de operación

El sistema deberá ser capaz de trabajar automáticamente, es decir que no debe utilizar ningún operario y además no debe incluir ningún equipo que dificulte su operación continua. Al decir automáticamente se refiere a que una vez accionada la banda transportadora, el sistema de lavado comience a operar, sin necesidad de tener un operario.

- 3 = Trabaja 100% automáticamente, con lo que facilita su operación
- 2 = Trabaja semi automáticamente, requiere por lo menos un operario
- 1 = Requiere más de un operario y no es automático

✓ Funcionalidad

Se refiere a que el sistema permita ser acoplado a la banda transportadora de cullet sin obstaculizar su movimiento u operación, además que requiera el mínimo de partes o equipos para que funcione correctamente.

- 3 = El sistema se acopla perfectamente y requiere el mínimo de equipo

- 2 = El sistema se acopla, pero requiere de bastantes equipos adicionales
- 1 = El sistema no es acoplable y requiere equipos adicionales.

✓ Volumen ocupado

El sistema deberá ocupar el mínimo espacio, es decir: la mejor opción será el sistema que ocupe el menor volumen.

- 3 = Ocupa entre 1 a 3 m³
- 2 = Ocupa de 3.5 a 6 m³
- 1 = Ocupa más de 6.5 m³

✓ Consumo de agua

El sistema deberá ahorrar agua, es decir que tendrá utilizar el mínimo de agua.

- 3 = Utiliza de 10 a 60 litros de agua por hora
- 2 = Utiliza de 61 a 110 litros de agua por hora
- 1 = Utiliza más de 110 litros por hora

En la tabla 5.13 se muestran las calificaciones para cada concepto o método expuesto anteriormente, donde se mencionan sus características.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

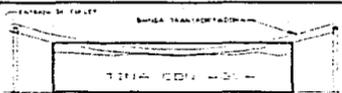
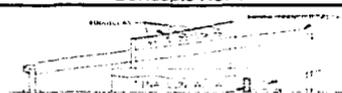
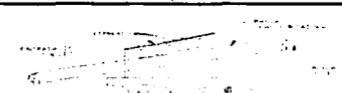
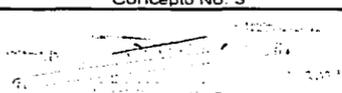
CONCEPTO	CRITERIOS						TOTAL
	Eficiencia	Mantenimiento	Facilidad de operación	Funcionalidad	Volumen ocupado	Consumo de agua	
	3	1	2	1	1	1	14
Concepto No. 1							
	3	2	3	3	2	2	14
Concepto No. 2							
	3	3	3	3	3	3	18
Concepto No. 3							
	3	2	3	2	2	2	14
Concepto No. 4							
IDEAL	3	3	3	3	3	3	18

Tabla 5.12 Evaluación de los conceptos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

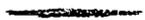
En la tabla 5.12 se observa que el concepto 3 del sistema de lavado sería el más adecuado al proceso, con lo que ahora se procede a diseñar el sistema.

Diseño del sistema de lavado de cullet utilizando el concepto No. 3

Una vez que se ha establecido el concepto 3, ahora se determinan las dimensiones de la tina, modelo y tipo de espreas a utilizar, selección del sistema de bombeo, material de la tubería, diámetro de tubería, etc.

De acuerdo con la Figura 5.46 en la que se muestran las dimensiones de la banda transportadora, ahora se analizará que tipo de espreas a utilizar para que el agua abarque el ancho de la banda y así utilizar el mínimo de espreas; para que después de su selección y conociendo el consumo de agua por minuto y presión que requieren, se pueda diseñar la tina y el sistema de bombeo.

A continuación se muestran los tipos de espreas existentes comercialmente y sus características.

ESPREA TIPO ABANICO	
	<p>Como su nombre lo indica, este modelo esprea el agua en forma de abanico, con lo que el agua abarca un área bastante grande, además que puede tener ángulos de apertura de hasta 110°, dependiendo del tipo y modelo de esprea.</p> <p>Existen boquillas con diámetros de 0.3 cm hasta 7.6 cm</p>
ESPREA TIPO CONO	
	<p>El agua espreada por este modelo sale en forma de cono y al final abarca un área bastante amplia, de acuerdo al diámetro de la esprea, lo que la hace eficiente para la limpieza de partes o equipo de gran tamaño.</p>

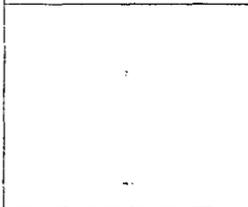
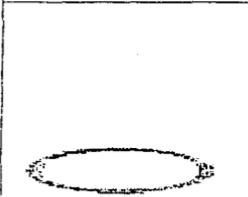
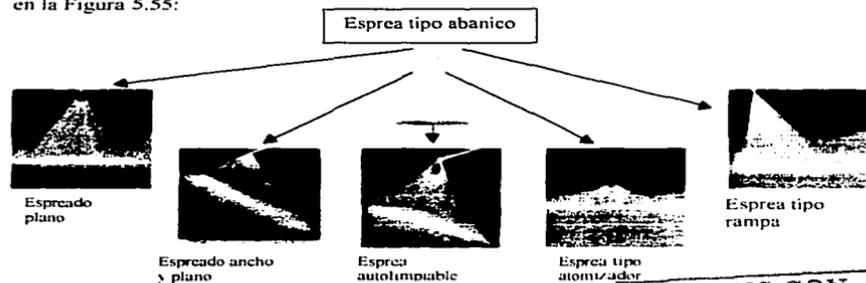
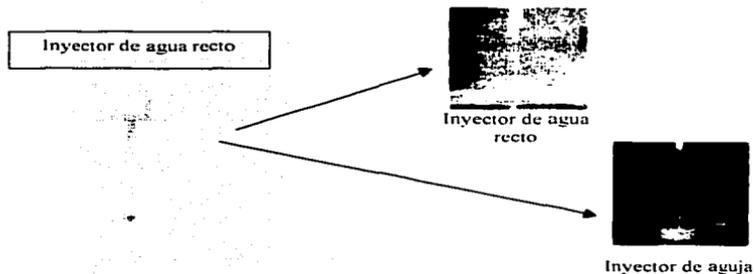
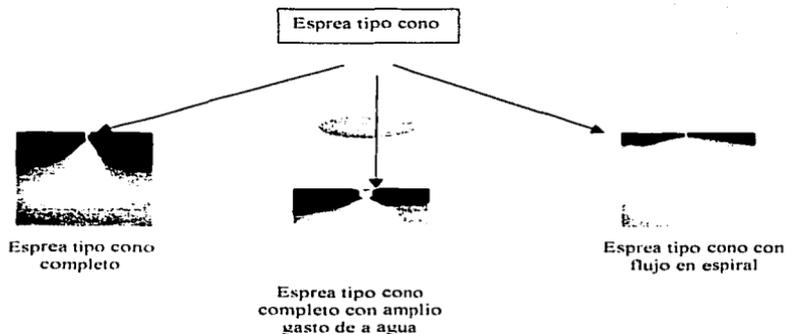
ESPREA TIPO JET	
	El agua se esprea en forma lineal, como si fuera un inyector, usualmente esta esprea se utiliza en líneas de corte de papel o de alimentos
ESPREA TIPO CONO VACIO	
	Como su nombre lo indica, esta boquilla esprea el agua en forma de cono, pero en el área del centro no esprea agua; por lo anterior no tiene grandes flujos de agua, lo que la hace adaptable para diversos procesos.

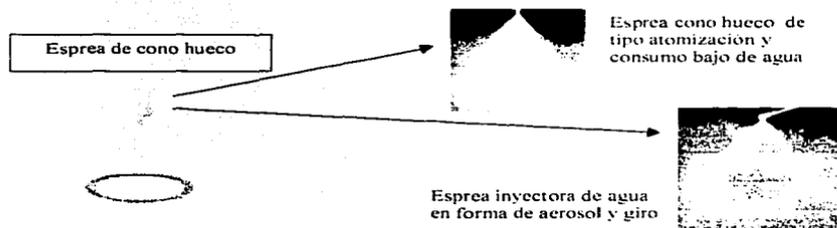
Tabla 5.13 Modelos disponibles de espreas

De las espreas mostradas en la tabla 5.13 se derivan diferentes modelos, que se muestran en la Figura 5.55:





TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Figuras 5.55 Diversos tipos de espreas

Selección de la esprea adecuada al proceso

El ancho de la banda es de 0.60 m (60 cm), por lo que se requiere que el esprayado o chorro de agua abarque este ancho. Como se observó en la figura 5.4 que muestra los diferentes tipos de esprayado del agua con diferentes modelos de espreas, ahora lo que se deberá conocer para cada modelo, son sus especificaciones, como el ángulo y área sobre la que esprean el agua.

Una de las características del sistema seleccionado es el ahorro en el consumo de agua, que sea autolimpiable y que requiera el mínimo de equipo; por lo que la selección de la esprea se limita a las características mencionadas. De lo anterior el tipo de esprea con estas características es la siguiente:

- ✓ Esprea tipo abanico autolimpiable (Figura 5.56).



Figura 5.56 Esprea tipo abanico autolimpiable

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la tabla 5.15 se muestran las especificaciones de estos tipos de espreas.

Número de lista de la boquilla	Diámetro del orificio equivalente (mm)	Angulo de espray (grados)	Gasto (l/min) a la presión siguiente (MPa)														
			0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0				
SCF	0215	15															
	0240	40															
	0280	80	1.1	1.6	2.0	2.6	3.1	3.7	4.5	5.2	6.4	7.4	8.3				
	02130	130															
	0415	15															
	0440	40															
	0480	80	2.3	3.3	4.0	5.2	6.1	7.3	8.9	10.3	12.6	14.6	16.3				
	04130	130															
	0615	15															
	0640	40															
	0680	80	3.5	4.9	6.0	7.7	9.2	11.0	13.4	15.5	19.0	21.9	24.5				
	06130	130															
	1015	15															
	1040	40															
	1080	80	5.8	8.2	10.0	12.9	15.3	18.3	22.4	25.8	31.6	36.5	40.8				
	10130	130															
	1415	15															
	1440	40															
	1480	80	8.1	11.4	14.0	18.1	21.4	25.6	31.3	36.1	44.2	51.0	57.0				
	14130	130															
1815	15																
1840	40																
1880	80	10.4	14.7	18.0	23.2	27.5	32.9	40.2	46.5	57.0	65.8	73.6					
18130	130																

Tabla 5.14 Especificaciones de las espreas tipo abanico autolimpiable

Para seleccionar el modelo, se tendrá que realizar un esquema en el cual se muestre el ángulo requerido y la distancia que debe existir entre la boquilla y la banda transportadora. Este esquema se muestra en la Figura 5.53.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

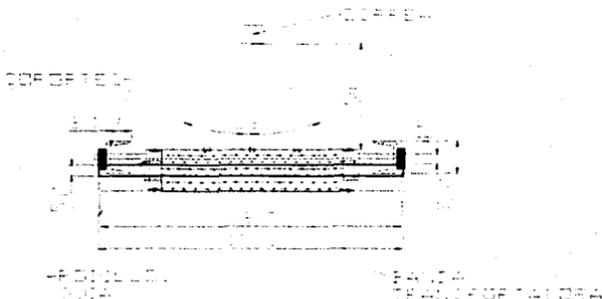


Figura 5.57 Esquema de la distancia existente entre la esprea y la banda

Uno de los objetivos en cuanto al diseño del sistema de lavado, es el ahorro en el consumo de agua, por lo que en la Figura 5.57 se muestra un esquema con una sola boquilla, pero como se sabe, el cullet va distribuido a todo lo ancho de la banda transportadora de manera aleatoria, por lo que se recomienda tener por lo menos tres boquillas con diferente ángulo de espray y posición sobre la banda.

En la figura 5.58 se muestra el ángulo que puede tener el espray de agua sobre la banda si se instalan dos espreas. Adicionalmente, en la figura 5.59 se observa en una vista lateral de la forma en que se instalarían tres boquillas con la finalidad de abarcar una área mayor de espray de agua para lavar todo el cullet que pasa en esa parte de la banda.

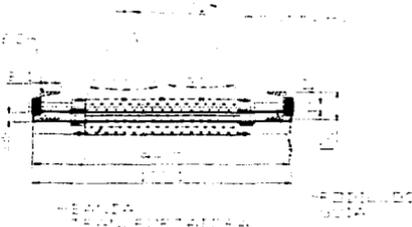


Figura 5.58 Esquema de la banda transportadora con dos espreas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

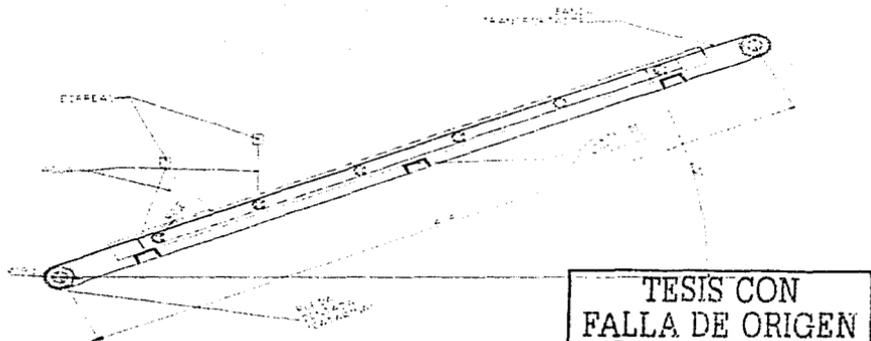


Figura 5.59 Vista lateral de la banda transportadora y de las espresas

En la figura 5.59 se proporciona la distancia que deben tener las espresas a la banda transportadora y el ángulo de esparcido del agua; con estos datos se puede seleccionar la espresa adecuada para que proporcione el ángulo requerido. En la tabla 5.14 donde se muestran las especificaciones de las espresas tipo abanico autolimpiables, se tiene que los modelos que proporcionan este ángulo y sobre todo el consumo mínimo de agua son:

1.- Modelo SCF 0240, con orificio de 1.3 mm y ángulo de esparcido de 40°. El consumo por minuto de agua es de 1.1 litros/min a una presión de 0.1 Mpa. Instalando tres de estas espresas, se cumple con el requisito de abarcar el ancho de la banda y tener el mínimo consumo de agua.

A continuación, se procede a calcular el consumo de agua para tres espresas.

Una espresa consume 1.1 litros por minuto, con tres espresas se tendría un consumo de 3.3 litros por minuto (198 litros por hora), pero este mismo volumen de agua se recirculará y por lo tanto será suministrado de nuevo a las espresas.

Ahora, con este consumo de agua, se diseñará la tina que almacenará el volumen de agua requerido por las tres espresas.

Con las dimensiones y el ángulo de la banda transportadora, se tendrá que ubicar el contenedor o estanque donde se almacenará el agua; por lógica ésta debe estar lo más cerca posible de la banda, debido a la recirculación del agua, esto quiere decir que al tener

las espumas por encima de la banda, el agua tenderá a caer de nuevo al contenedor para que después el agua se filtre y se suministre de nuevo a las espumas. En la Figura 5.61 se muestran las dimensiones existentes entre la banda y el suelo y el esquema de este proceso se observa en las Figuras 5.61 y 5.62.

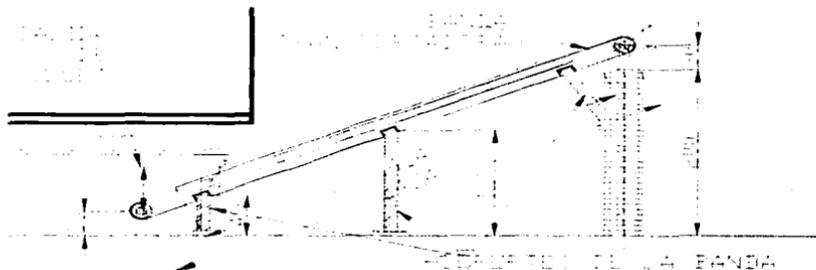


Figura 5.61 Dimensiones de la banda al suelo (cotas en centímetros)

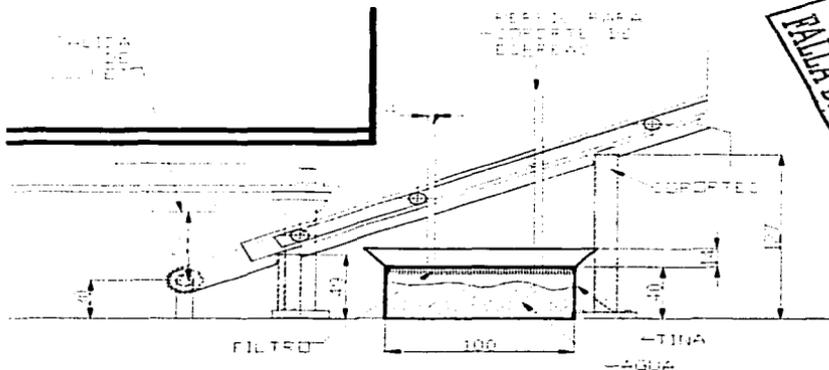


Figura 5.62 Esquema del sistema de lavado de cullet

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

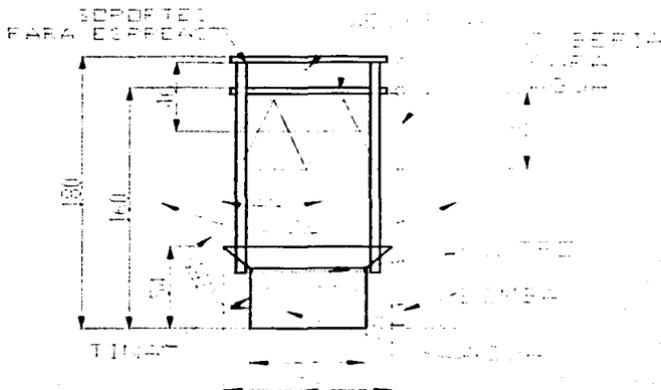


Figura 5.62 Esquema del sistema de lavado de cullet

El volumen de la tina es de 0.2 m^3 , debe de fabricarse con lámina resistente a la corrosión, para esto se tiene acero inoxidable o acero galvanizado.

Para la selección de la lámina adecuada para la tina, debe considerarse principalmente el precio y la resistencia a la corrosión. Comercialmente, el precio de la lámina galvanizada es más bajo que el del acero inoxidable, sin embargo, el acero inoxidable garantiza una operación prácticamente sin erosión debido a la corrosión, por lo que se propone fabricar la tina de acero inoxidable.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones que se obtuvieron en el desarrollo del presente proyecto:

1. La propuesta presentada en este trabajo de tesis es técnicamente viable ya que es posible integrar equipos que ya existen comercialmente en un proceso que permite la eliminación de los materiales contaminantes del cullet y su utilización para la producción confiable de vidrio plano nuevo. Además de que se incluye una propuesta técnica para la interconexión de los equipos mediante sistemas de transporte de cullet (transportadores de banda y de cangilones), así como un sistema para el lavado con agua del cullet, diseñados básicamente para cumplir con las condiciones dadas para cada caso.

2. El sistema de limpieza de cullet propuesto cubre las necesidades declaradas de Vidrio Plano de México (5 toneladas por hora) y es capaz de absorber demandas futuras con suficiente capacidad; todos los equipos propuestos para la integración del sistema de limpieza tienen capacidades de proceso mayores que las especificadas por Vidrio Plano de México.

3. Los requerimientos de mano de obra para la limpieza del cullet utilizado por Vidrio Plano de México para la producción de vidrio plano flotado se reducen sustancialmente con el uso del sistema propuesto, con las ventajas inherentes en el costo de la mano de obra que involucra el proceso.

La implantación de un sistema de limpieza de cullet como el propuesto en la empresa señalada, o en cualquiera otra empresa productora de vidrio plano flotado, reportaría las siguientes ventajas:

Eliminación de la incertidumbre actual resultante del uso extensivo de personal que realiza la función de retiro de materiales contaminantes confiando sólo en su agudeza visual pero perjudicando su salud, lo que impide asegurar que la calidad del cullet para la producción de vidrio plano nuevo sea la mejor.

Reducción de las necesidades de energía necesaria para la producción del vidrio plano flotado. Se requiere de aproximadamente 30% menos energía para fundir el cullet que para fundir las arenas silíceas que constituyen la materia prima del vidrio plano.

Reducción del costo de la materia prima para la elaboración de vidrio plano flotado. El precio del cullet limpio es aproximadamente el 50% del precio de las arenas silíceas utilizadas para la producción del vidrio plano flotado. Esta diferencia constituye un enorme atractivo económico para incrementar en lo posible el uso de cullet en la producción de vidrio.

Aumento de la disponibilidad de cullet para la producción de vidrio al poder procesar cullet procedente de otras fuentes exteriores a la propia planta productora (cullet foráneo) de manera confiable.

Comentarios finales

Como pudo observarse a lo largo del trabajo, en el caso de la industria del vidrio existe la posibilidad de incrementar el uso de pedacera de vidrio para producir vidrio nuevo, (flotado tipo plano para este caso específico) si se superan los inconvenientes causados por la inclusión de materiales que se consideran contaminantes para el proceso de fabricación (fundición y estirado por flotado).

Se considera que la industria nacional debe analizar seriamente la posibilidad de adquirir (o integrar, como en el caso de este trabajo) un sistema para la eliminación de contaminantes del cullet.

Asimismo, se estima que la industria nacional debe integrar un equipo de trabajo dentro de sus empresas, dedicado a la organización eficiente de los sistemas de reciclado. No existe nadie que conozca más los detalles involucrados en el proceso, que el personal que las integra. Este mismo personal podría evaluar en principio la implantación del sistema automático de eliminación de contaminantes.

Es importante que las autoridades nacionales correspondientes difundan información sencilla y clara sobre las posibilidades de reciclamiento de desperdicios de vidrio que permita crear conciencia de las ventajas económicas y ambientales que dicho reciclamiento ofrece.

Bibliografía

Publicaciones

- Callister, William D. *Materials science and engineering: An introduction*. 4th Ed. John Wiley & Sons. 852 p.
- Catalogo 1090, Martin Sprocket & Gear. pp. H-121, H-125, H-147-148
- Conveyor Equipment Manufacturers' Association's (CEMA) Handbook, pp. 24.26
- Gilchrist, J. D. *Combustibles y refractarios*. Ed. Alhambra. S. A. 1967.
- How to start manufacturing industries. Refuse sorting plant. File: Z 27, ISIC CODE 9000, December 1993. United Nations Industrial Development Organization. UNIDO.
- Lide David R. *Handbook of Chemistry and Physics*. 82nd Edition 2001-2002. CRC Press pp. 12-226-12-227
- McMaster, Robert C. *Non Destructive Testing Handbook*. Society for Nondestructive Testing, 1959.
- Rawson, Harold. *Properties and applications of glass*. The Netherlands, Elsevier Scientific Publication Company, 1980. 318 p.
- Rodriguez, D., *Application of Differential Grinding for Fine Cullet Production and Contaminant Removal*, Ceramic Engineering Science Procedures, No. 16, Vol. 2, pp. 96-100, 1995.
- Ross, Robert B. *Handbook of metal treatments and testing*. Second edition. Chapman and Hall, 1998. 586 p.
- Separation Technologies for the Industries of the Future*, The National Academy Press, E. E. U. U. A., 1999, pp. 74-78
- Shelby, James E. *Introduction to glass science and technology*. The Royal Society of Chemistry, 1997. 244 p.
- Trejo Vázquez Rodolfo. *Procesamiento de la basura urbana*. Editorial Trillas. México, Marzo 1994

Páginas de Internet

<http://www.arrowcorp.com/spanishpages/spseparators/html>
<http://www.belting.cc/beltdata/tension-calculator.htm>
<http://www.eriez.com>
<http://www.eriez.com> (equipos para separación magnética)
<http://www.everloy-spray-nozzles.com> (boquilla y espreas para agua)
<http://www.forsbergs.com>
<http://www.glassonline> (información vidrio plano)
<http://www.glassonweb.com> (historia del vidrio plano)
<http://www.glassresource.com> (información vidrio plano)
<http://www.mcintoshengineering.com>
<http://www.mgsep.com>
http://www.mogensen.de/e/produkte/microsort_2.html
<http://www.OLTE3HandbookG.htm>
<http://www.packandlabe.com.eng.tech3.html>
<http://www.reciclar.com.mx>
<http://www.srbg.de/zumthema/siebma2.htm>
<http://www.thompsonmagnetics.com> (separación magnética)

Artículos

Dalmijn, W.L. and van Houwelingen J.A. "Glass Recycling" in Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials. Edited by P.B. Queneau and R.D. Peterson. The Minerals, Metals & Materials Society, 1995. pp 993-1011.

Dalmijn, W.L. and van Houwelingen J.A. "New developments in the processing of the non ferrous metal fraction on car scrap" in Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials. Edited by P.B. Queneau and R.D. Peterson. The Minerals, Metals & Materials Society, 1995. pp 739-750.

Fletcher, D. Gerber, R. Lawson, P., and Boehm J. "Eddy-current separation of non-ferrous conductors and non conductors: Theory and initial experiments," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No. 6, November 1991, pp. 5375-5377.

Rosenfeld, A. and Gesing A. "Sorting aluminum alloy scrap by laser induced optical emission spectroscopy" in Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials. Edited by P.B. Queneau and R.D. Peterson. The Minerals, Metals & Materials Society, 1995. pp 751-763.

Sattler, Peter. "The laser scrap sorting technique, new developments and first operational experience" in Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered

Materials. Edited by P.B. Queneau and R.D. Peterson. The Minerals, Metals & Materials Society. 1995. pp 57-64.

Wolterbeck, M. Ludwig, R., and Michaelson, W. "A quantitative analysis of the separation of aluminum cans out of a waste stream based on eddy current induced levitation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, No. 1, January 1997, pp. 772-780.

Revistas

"Magnetic separation system aid light bulb recycling" in Glass. Published monthly by dmg world media (UK) ltd. Vol. 77, No. 8, September 2000, pp. 286

"Glass sorting system transforms raw cullet" in Glass. Published monthly by dmg world media (UK) ltd. Vol. 77, No. 9, October 2000, pp. 317