



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE UN SEPARADOR POR TAMAÑO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
MUNICIPALES”

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

PRESENTA:

ING. ANDREA ADRIANA MUÑOZ GASCA

TUTOR:

M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS



2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. González Martínez Simón

Secretario: M.I. González González Leopoldo Adrián

Vocal: M.C. Gutiérrez Palacios Constantino

1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. Solórzano Ochoa Gustavo

2<sup>do</sup>. Suplente: M. en C. Ramírez Burgos Landy Irene

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Posgrado de Ingeniería e instalaciones de la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) del D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

M.C. Constantino Gutiérrez Palacios

---

**FIRMA**

*Para Abraham con amor*

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación que me ha dado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado durante la realización de la maestría.

A mi tutor, mis sinodales y a mis maestros en general por todo lo que me enseñaron.

Gracias a mis papás, mis hermanas, mi hermano y mi sobrina por su apoyo a través de todos estos años.

También agradezco a mis amigas y amigos por los buenos momentos y también por los no tan buenos.

# Índice

|  | Página |
|--|--------|
| Índice   | I      |
| Índice de tablas   | III    |
| Índice de figuras  | IV     |
| Acrónimos  | V      |
| Resumen  | 1      |
| 1. Introducción  | 2      |
| 1.1. Introducción  | 2      |
| 1.2. Justificación   | 4      |
| 1.3. Objetivo general  | 4      |
| 1.4. Objetivos particulares  | 5      |
| 1.5. Alcances  | 5      |
| 2. Antecedentes  | 6      |
| 2.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)   | 6      |
| 2.2. Procesamiento de residuos sólidos y materiales reciclables              | 7      |
| 2.3. Separadores de residuos por tamaño                                      | 13     |
| 2.3.1 Criterios de diseño  | 13     |
| 2.3.2 Separadores <i>trommel</i>   | 15     |
| 2.4. Separadores tipo <i>trommel</i> en México                               | 19     |
| 2.4.1 Equipo <i>trommel</i> en la planta de separación de Santa Catarina     | 20     |
| 2.4.2 Equipo <i>trommel</i> en la planta de composta de Mérida, Yucatán      | 20     |
| 2.4.2.1 Visita a la planta de composta de Mérida Yucatán                     | 21     |
| 2.4.2.1.1 Datos obtenidos  | 22     |
| 2.4.2.1.2 Problemas de operación   | 23     |
| 2.5. Aplicaciones de un <i>trommel</i> en la Ciudad de México                | 25     |
| 2.5.1 Planta de composta   | 25     |
| 2.5.2 Reuso de sitios de disposición final                                   | 26     |
| 2.5.3 Estabilizadores de materia orgánica en rellenos sanitarios             | 27     |
| 2.5.4 Planta de selección de residuos sólidos                                | 28     |
| 2.5.5 Selección de la aplicación que se estudiará                            | 29     |
| 3. Condiciones de aplicación, características y selección del <i>trommel</i> | 31     |
| 3.1 Plantas de selección en la Ciudad de México                              | 31     |
| 3.2 Residuos que se manejarán en las plantas de selección                    | 32     |
| 3.3 Condiciones de aplicación del <i>trommel</i> en la Ciudad de México      | 33     |
| 3.3.1 Condiciones legales  | 33     |
| 3.3.2 Condiciones políticas  | 34     |
| 3.3.3 Condiciones sociales   | 35     |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.4 Condiciones laborales  | 36 |
| 3.3.5 Condiciones económicas   | 37 |
| 3.3.6 Condiciones técnicas   | 37 |
| 3.4 Características de equipos <i>trommel</i> analizados   | 38 |
| 3.5 Selección del separador más adecuado para el trabajo en las condiciones de la Ciudad de México | 42 |
| 3.6 Precio de los equipos comerciales  | 46 |
| 4. Diseño Conceptual   | 47 |
| 4.1 Planta de selección de residuos sólidos municipales  | 47 |
| 4.1.1 Planta de selección tecnificada  | 48 |
| 4.1.2 Planta de selección actualmente utilizada en el DF   | 49 |
| 4.1.3 Propuesta de tecnificación inicial de las plantas del DF                                     | 49 |
| 4.2 Diseño conceptual del trommel  | 50 |
| 4.2.1 Reconocimiento de necesidades  | 51 |
| 4.2.2 Definición de especificaciones   | 52 |
| 4.2.3 Definición de función principal  | 52 |
| 4.2.4 Definición de subfunciones y alternativas de solución  | 53 |
| 4.2.5 Selección de métodos   | 56 |
| 4.2.5.1 Definición de los parámetros para la selección   | 56 |
| 4.2.5.2 Selección de método de solución a cada sistema   | 58 |
| 4.2.6 Desarrollo de diseño conceptual  | 59 |
| 4.2.7 Estimación del costo de construcción del equipo  | 66 |
| 4.2.8 Especificaciones de operación  | 67 |
| 4.2.9 Pasos para el cálculo del incremento en la eficiencia  | 67 |
| 5. Conclusiones  | 69 |
| Anexo A. Proveedores de equipos consultados  | 71 |
| Anexo B. Matrices de factor de peso de decisión  | 72 |
| Anexo C. Planos conceptuales de los elementos que conforman el <i>trommel</i>                      | 79 |
| Anexo D. Características de fabricación propuestas   | 85 |
| Anexo E. Selección del perfil para el soporte principal  | 87 |
| Bibliografía   | 92 |

## Índice de tablas

| Capítulo | No. De tabla | Nombre   | Página |
|----------|--------------|--|--------|
| 2        | 2.1          | Parámetros de operación típicas de un separador tipo <i>trommel</i>        | 15     |
| 3        | 3.1          | Características de las plantas de selección del D.F.                       | 31     |
| 3        | 3.2          | Resumen de la operación en las Plantas de Selección del Distrito Federal   | 32     |
| 3        | 3.3          | Características de equipos <i>trommel</i> analizados                       | 39     |
| 3        | 3.4          | Cumplimiento de los <i>trommel</i> analizados con las condiciones técnicas | 43     |
| 4        | 4.1          | Especificaciones con métrica y valor                                       | 52     |
| 4        | 4.2          | Matriz morfológica   | 54     |



## Índice de figuras

| Capítulo | No. De figura | Nombre  | Página |
|----------|---------------|---|--------|
| 2        | 2.1           | Separador binario   | 8      |
| 2        | 2.2           | Separador de superficies vibratorias  | 9      |
| 2        | 2.3           | Separador de discos   | 9      |
| 2        | 2.4           | Separación por aire   | 11     |
| 2        | 2.5           | Separador ferromagnético  | 12     |
| 2        | 2.6           | Tipos de movimiento generados en un <i>trommel</i> .                              | 16     |
| 2        | 2.7           | Análisis de una partícula en el separador   | 17     |
| 2        | 2.8           | Recorrido de una partícula al perder contacto con la pared                        | 18     |
| 2        | 2.9           | Planta de composta de Mérida  | 21     |
| 2        | 2.10          | <i>Trommel</i> instalado en la planta de composta de Mérida                       | 22     |
| 2        | 2.11          | <i>Trommel</i> instalado en la planta de composta de Mérida                       | 22     |
| 2        | 2.12          | Rodillo limpiador del <i>trommel</i>  | 24     |
| 2        | 2.13          | Residuos embolsados como parte de la fracción “grande”                            | 24     |
| 2        | 2.14          | <i>Trommel</i> utilizado en planta de composta en Buenos Aires                    | 26     |
| 2        | 2.15          | <i>Trommel</i> utilizado en relleno sanitario                                     | 27     |
| 2        | 2.16          | <i>Trommel</i> utilizado en relleno sanitario                                     | 28     |
| 2        | 2.17          | Planta de selección en la Ciudad de México  | 29     |
| 4        | 4.1           | Tren de separación de residuos tecnificada  | 48     |
| 4        | 4.2           | Arreglo de las bandas en las plantas de selección instaladas en el DF             | 49     |
| 4        | 4.3           | Configuración propuesta para la tecnificación inicial de las plantas de selección | 50     |
| 4        | 4.4           | Diagrama de caja negra  | 53     |
| 4        | 4.5           | Relación entre sistemas   | 53     |
| 4        | 4.6           | Vista isométrica del ensamble general   | 60     |
| 4        | 4.7           | Vista posterior del ensamble general  | 61     |
| 4        | 4.8           | Vista lateral derecha del ensamble general  | 62     |
| 4        | 4.9           | Vista frontal del ensamble general  | 63     |
| 4        | 4.10          | Vista lateral izquierda del ensamble general                                      | 64     |
| 4        | 4.11          | Vista superior del ensamble general   | 65     |

## **Acrónimos**

|          |   |
|----------|---|
| DF       | Distrito Federal  |
| DGSU     | Dirección General de Servicios Urbanos  |
| GDF      | Gobierno del Distrito Federal   |
| JICA     | Japan International Cooperation Agency (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) |
| LGPGIR   | Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos                       |
| LRSDF    | Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal  |
| PEAD     | Polietileno de Alta Densidad  |
| PEBD     | Polietileno de Baja Densidad  |
| PET      | Polietilén tereftalato  |
| PGGIRS   | Programa General de Gestión Integral de los Residuos Sólidos                            |
| PP       | Polipropileno   |
| PS       | Poliestireno  |
| PVC      | Policloruro de vinilo   |
| RSM      | Residuos Sólidos Municipales  |
| RSU      | Residuos Sólidos Urbanos  |
| SEMARNAT | Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales                                      |

## Resumen

Actualmente, la cantidad de residuos sólidos (RS) generados en la Ciudad de México es de poco más de 12,000 toneladas al día (PGGIRS, 2004). Para reducir la cantidad de residuos sólidos que llegan al sitio de disposición de Bordo Poniente, el cual se encuentra cerca de su saturación, y así extender su vida útil, se instalaron tres plantas de selección donde se recuperan los materiales que se reciclan en el DF. Las plantas de selección constan básicamente de bandas en las que se transportan los residuos para que los seleccionadores tomen los materiales, los residuos que no son separados se envían a disposición final. La eficiencia de separación en las plantas es muy baja, en promedio es de 5.3%.

Con el fin de incrementar la eficiencia en las bandas se propone la colocación de un separador de residuos por tamaño en la parte inicial de las bandas para eliminar los residuos que por su tamaño no son factibles de recuperarse y dirigirlos inmediatamente a la zona de rechazo, lugar al que de cualquier forma llegan ya que los seleccionadores no los recuperan.

Las condiciones de aplicación del separador en el DF son diferentes a las condiciones en los países en desarrollo donde se diseñan los mismos, por lo que se estudiaron las condiciones locales a las cuales estaría expuesto el equipo. Entre estas condiciones se analizaron las legales, políticas, sociales, laborales, económicas y técnicas.

Una vez conociendo las condiciones se seleccionó un equipo comercial y basándose en éste se realizó el diseño conceptual de un separador que tenga un mejor desempeño en las plantas del DF.

Instalando el separador en las plantas de selección se incrementará la eficiencia de separación de las mismas, mientras más adaptado sea el diseño a las condiciones en las que trabajará, el incremento en la eficiencia será mayor. Con esto se reducirá la cantidad de RS que llegan al sitio de disposición final.

## **1. Introducción**

### **1.1 Introducción**

Los residuos sólidos que se generan en la sociedad pueden convertirse en un problema ambiental y de afectación a la salud humana cuando no son manejados adecuadamente. Asimismo, la limitada infraestructura para reciclar estos residuos en grandes ciudades demanda mayores espacios para su disposición final.

En el Distrito Federal (DF) se generan más de 12,000 toneladas por día de residuos sólidos municipales de las cuales la mayor parte se destina a disposición final. Existen 3 plantas de selección y aprovechamiento de residuos sólidos -Bordo Poniente, Santa Catarina y San Juan de Aragón- con una capacidad instalada de 6,500 toneladas por día y donde se recuperan 16 tipos de materiales reciclables diferentes, sin embargo, la eficiencia operativa de recuperación es muy baja, alcanzando en promedio 5.3% (PGGIRS, 2004). El único sitio de disposición final que opera en la actualidad en el DF es el relleno sanitario Bordo Poniente, el cual se encuentra casi a toda su capacidad; se estima que para el 2006 llegue a su saturación. De acuerdo con el estudio de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA, 1999), la vida útil de la “Etapa IV” en Bordo Poniente funcionaría hasta el 2001 y se consideraba como prioritario encontrar un nuevo emplazamiento para un relleno sanitario, así como reducir la cantidad de residuos que se llevan a disposición final. En este mismo estudio se menciona que las plantas de separación se encuentran excesivamente cargadas con residuos lo que disminuye la eficiencia en la separación.

El Gobierno del Distrito Federal (GDF) está en busca de alternativas técnicas y legales para hacer más eficiente el manejo de los residuos sólidos y en particular para extender la vida útil del relleno sanitario mencionado. La Secretaria del Medio Ambiente tiene entre sus facultades: “Promover la investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías, equipos, sistemas y procesos que eliminen, reduzcan o minimicen la liberación al ambiente y la transferencia de uno a otro de sus elementos, de contaminantes provenientes del manejo de los residuos sólidos. El GDF emitió la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (Gaceta oficial del DF 22 de abril 2003); de acuerdo con esta ley a partir del 1 de Octubre de 2004

todos los generadores deberán separar la basura en materiales orgánicos e inorgánicos, con el fin de propiciar condiciones para el reciclaje y tratamiento de los residuos.

En el tratamiento de dichos residuos, se requiere de la mayor parte de los procesos como: compostaje, incineración, producción de biogás y combustible. Para que esos procesos sean más efectivos se debe realizar la separación de los residuos dependiendo de las características que se quieren utilizar. Una de estas características es el tamaño de los residuos; para lograr la separación por tamaño se han utilizado diferentes equipos con distintos principios de diseño. Existen en el mercado varios tipos de separadores mecánicos, la mayoría de ellos diseñados para las condiciones de países desarrollados. Un ejemplo de ello es el separador mecánico por medio de cribas cilíndricas rotatorias que en el lenguaje técnico internacional se denomina *trommel*.

Para el caso de los residuos, el *trommel* se ha utilizado para separar los residuos orgánicos de los inorgánicos. Esto se debe a que generalmente los residuos orgánicos son de menor tamaño que los inorgánicos, pero esto no significa que los residuos de la fracción “pequeña” sean únicamente orgánicos o los de la fracción “grande” inorgánicos, ya que las dos fracciones contienen ambos tipos de residuos. Del mismo modo se han utilizado los *trommels* para las plantas de selección en las cuales se colocan al inicio del proceso para enviar a separación la fracción “grande” y a rechazo la fracción “pequeña”.

La mayor contribución que realiza el *trommel* en el manejo de los residuos se da en la etapa del reciclaje. Dentro de la utilización que puede tener un *trommel* en el manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU), en la Ciudad de México, se encuentran las plantas de selección. Una planta de selección se define como “la instalación donde se lleva a cabo cualquier proceso de selección y tratamiento de los residuos sólidos para su valorización o, en su caso, disposición final”(LRSDF, 2003).

Las plantas de selección que se encuentran actualmente instaladas y que están a cargo del GDF están constituidas, básicamente, de bandas donde son transportados los residuos para que un grupo de personas seleccione de forma manual los materiales que son factibles para el reciclaje y que se pueden comercializar. En la observación que se ha tenido de las plantas de selección, los pepenadores o seleccionadores, sólo recuperan los materiales de cierto tamaño, aunque encuentren un material reciclable, si no tiene un tamaño que haga redituable su recuperación, lo dejan en la banda. Los residuos que no son seleccionados se

consideran como rechazo, los cuales se llevan al sitio de disposición final; en el caso de la Ciudad de México es el relleno sanitario denominado Bordo Poniente. Mientras más materiales se recuperen en la banda, menos residuos irán a disposición final, lo que incrementará la vida útil del único sitio de disposición final con el que cuenta el Distrito Federal actualmente.

Dentro de una planta de selección, si los residuos que pasan por las bandas son aquellos que son recuperables por parte de los pepenadores, se puede incrementar la eficiencia de recuperación, ya que únicamente los residuos que requieren ser separados ocuparían un espacio en la banda. Esto puede lograrse eliminando los residuos que son demasiado pequeños para ser seleccionados antes de que pasen por la banda y dirigirlos directamente a la zona de rechazo. Lo anterior se puede lograr colocando un separador por tamaño, tipo *trommel* al inicio de cada banda.

## 1.2 Justificación

Las condiciones de uso de equipos mecánicos, en general, son diferentes en cada país, por lo que existen diferencias en el diseño que deben tomarse en cuenta para que el funcionamiento de los mismos sea el más adecuado. En el caso de los separadores tipo *trommel*, el diseño se realiza en países desarrollados que no toman en cuenta las condiciones en que se encuentran los residuos en México, como tampoco las condiciones a las que se verá expuesto el equipo al funcionar en el DF.

Por lo anterior se justifica hacer un análisis y seleccionar el *trommel* comercial que se adapte mejor a las condiciones existentes en la actualidad en la Ciudad de México, así como proponer modificaciones de diseño para mejorar el rendimiento del separador y de esta manera contribuir a la reducción de los problemas ambientales y de salud originados por el manejo inadecuado de los residuos sólidos en el DF.

## 1.3 Objetivo general

Analizar diferentes equipos de separación por tamaño de residuos sólidos municipales tipo *trommel* y adaptar el diseño para las condiciones existentes en la Ciudad de México.

## 1.4 Objetivos Particulares

- Analizar las condiciones de trabajo a las que estaría expuesto un *trommel* en el DF
- Analizar las diferencias existentes en las condiciones de trabajo y costos de diferentes separadores de residuos sólidos
- Seleccionar el separador comercial más adecuado para operar en las condiciones de la Ciudad de México
- Efectuar el diseño conceptual de un separador basado en el diseño seleccionado para mejorar su aplicación en las condiciones del DF

## 1.5 Alcances

El estudio se realizará únicamente para las condiciones de la Ciudad de México.

El diseño conceptual del separador comprenderá:

- Especificaciones de operación
- Recomendaciones generales de diseño
- Planos conceptuales con dimensiones generales

Los costos del diseño propuesto se calcularán con base en precios de mercado y las especificaciones generales de fabricación obtenidas, pero sin llegar a análisis de precios unitarios.

## 2. Antecedentes

En este capítulo se presenta el marco teórico de los diferentes principios que se utilizan actualmente para la separación de residuos con el objetivo de explicar las diferentes funciones que tiene cada separador. También se describen algunos de los equipos que se encuentran instalados en México y sus problemas de operación. Finalmente se describen las diferentes aplicaciones que puede tener el *trommel* en la Ciudad de México de las cuáles se seleccionó la más adecuada para desarrollar el presente trabajo.

### 2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

En la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, se definen los conceptos básicos referentes al manejo de los residuos sólidos, sin embargo, en este trabajo, se tomarán las definiciones referentes al mismo tema que se establecen en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF, 2003) y que se presentan a continuación, ya que el estudio se realizó para las condiciones específicas de la Ciudad de México.

- Residuos sólidos urbanos - Los residuos generados en casa habitación, unidad habitacional o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, los provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados por esta Ley como residuos de manejo especial
- Residuos de manejo especial - Aquellos residuos que requieran sujetarse a planes de manejo específicos con el propósito de seleccionarlos, acopiarlos, transportarlos, aprovechar su valor o sujetarlos a tratamiento o disposición final de manera ambientalmente adecuada y controlada
- Residuos Orgánicos - Todo residuo sólido biodegradable
- Residuos Inorgánicos - Todo residuo que no tenga características de residuo orgánico y que pueda ser susceptible a un proceso de valorización para su



reutilización y reciclaje, tales como vidrio, papel, cartón, plásticos, laminados de materiales reciclables, aluminio y metales no peligrosos y demás no considerados como de manejo especial

- Composteo - El proceso de descomposición aerobia de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos específicos

En la misma Ley se considera que los residuos orgánicos (biodegradables) son únicamente los residuos alimenticios y los resultantes de las podas, aún y cuando materiales como el papel y el plástico son biodegradables de forma más lenta.

Para el manejo y aprovechamiento de los residuos orgánicos se propone el proceso de composteo. El resultado del composteo es la composta, que en términos generales se considera un mejorador de suelos.

## **2.2. Procesamiento de residuos sólidos y materiales reciclables**

Inicialmente, la separación de los residuos sólidos municipales (RSM) se comenzó a realizar para utilizarlos como combustible o para procesos biológicos como el composteo. En algunos países, se recolectan los residuos ya separados desde la fuente, pero en otros la composición de los residuos es más heterogénea y es necesario realizar una separación posterior.

Dependiendo de la cantidad de fracciones en las que se realice la separación se denomina al separador como: binario (dos fracciones) terciario (tres fracciones) o polinario (más de tres fracciones).

La eficiencia en la separación de un sistema se puede evaluar en términos del porcentaje de residuos de un tamaño que se encuentran mezclados con el otro al final del proceso. Para un separador binario y asumiendo que se tienen residuos compuestos por dos rangos de tamaños, X y Y, que quieren ser separados, la entrada de los residuos mezclados se denominará  $X_0 + Y_0$ , al final del proceso se tendrán dos conjuntos, 1 y 2, con una mezcla de los dos componentes, X y Y, denotadas de la siguiente forma: En el conjunto 1 se tendrá  $X_1$  cantidad de residuos de tamaño X y  $Y_1$  de residuos de tamaño Y, de la misma forma en el conjunto 2 se tendrán las cantidades  $X_2$  y  $Y_2$  (ver Figura 2.1) (Tchobanoglous, 1993).

La eficiencia de separación se define con la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia} = E_{(X,Y)} = |(X_1/X_0)-(Y_1/Y_0)| \times 100\% = |(X_2/X_0)-(Y_2/Y_0)| \times 100\% \quad \dots(1)$$

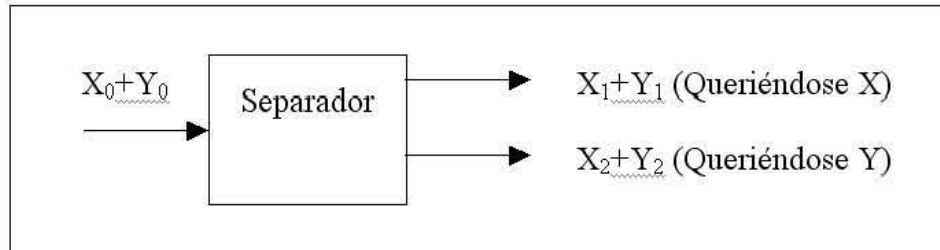


Figura 2.1. Separador binario. (Adaptado de Tchobanoglous, 1993)

Los RSM pueden separarse aprovechando alguna de las siguientes características inherentes a los diferentes materiales.

➤ *Separación por tamaño*

Esta separación se basa en pasar los RSM a través de superficies perforadas. Cuando los residuos son más pequeños que las perforaciones, éstos atraviesan la superficie; los mayores se retienen en la superficie. La superficie cilíndrica llamada *trommel* se ha utilizado efectivamente para la separación de vidrio, rocas y metal de piezas más grandes de papel y plástico. La separación por tamaño es uno de los primeros pasos que se siguen para el aprovechamiento de los residuos debido a que elimina materiales que pueden interferir con el funcionamiento de los demás equipos de separación (Rhyner, 1995).

Existen tres tipos generales de separadores por tamaño de partícula: vibradores, giratorios y de disco. La eficiencia de cada uno depende del tamaño de los agujeros, la velocidad de rotación o vibración, de las características del material de alimentación y del gasto del mismo.

*Superficies vibratorias*

Son superficies planas que pueden moverse de forma recíproca, es decir de un lado a otro, o formando círculos. Generalmente son superficies inclinadas. Muchas veces este sistema no es usado para residuos muy mezclados; se aplica

más satisfactoriamente para concentrar fracciones de residuos que han sido previamente separados hasta un tamaño relativamente pequeño de partículas (Rhyner, 1995).

En la Figura 2.2 se muestra un separador de superficies vibratorias.

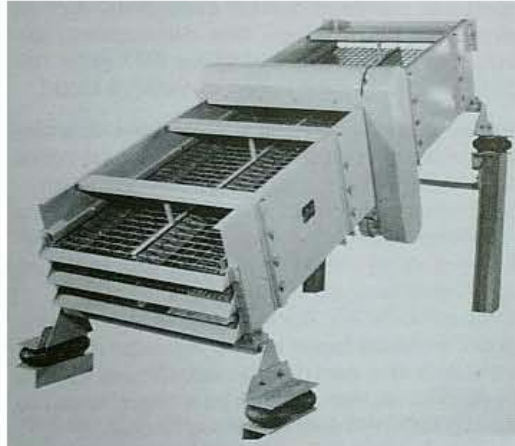


Figura 2.2. Separador de superficies vibratorias (Tchobanoglous, 1993)

### *Superficies giratorias o Trommel*

Es una superficie giratoria cilíndrica, el eje de rotación se encuentra inclinado ligeramente para facilitar el recorrido de los residuos.

### *De disco*

Consiste en discos lobulados montados en astas rotatorias perpendiculares a la dirección del flujo de material. Los residuos pequeños pasan entre los discos (Figura 2.3)

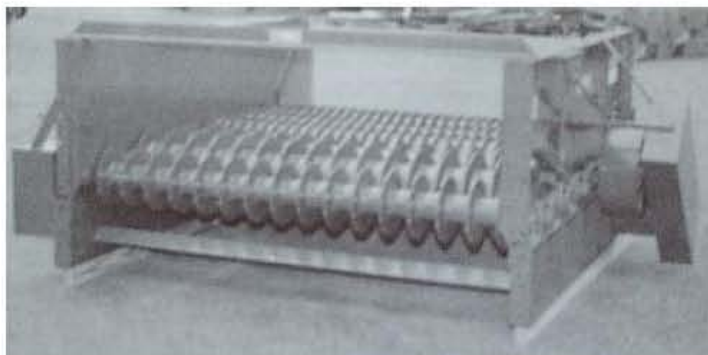


Figura 2.3. Separador de discos (Tchobanoglous, 1993)

➤ *Separación por densidad*

Existen separadores por densidad donde al utilizar algún líquido se conocen como húmedos y separadores secos.

*Flotación en un líquido*

Este método se utiliza para separar materiales menos densos que el líquido donde se introducen, de materiales más densos. Un ejemplo es la separación de Polietilentereftalato (PET) de los envases de Polietileno de alta densidad (PEAD), material del que están hechas las tapas.

*Cama fluida seca*

Consta de una base que contiene polvo de peso específico ubicado entre los valores de peso específico de los materiales que se quieren separar. Se inyecta aire por la parte baja del soporte lo que hace que el polvo se comporte como un fluido granular, se agregan los materiales que se separarán por la parte alta donde permanecerá el material ligero y en la parte baja se acumula el de densidad mayor.

*Clasificación por aire*

Se utiliza para separar materiales poco densos y de gran resistencia al aire, llamados la fracción ligera, de materiales densos y de poca resistencia al aire llamados fracción pesada. En un principio se tenían clasificadores verticales, donde el flujo de aire se inyectaba de abajo hacia arriba. También existen diseños de separadores en zig-zag. Actualmente existen más diseños de clasificadores horizontales donde el material (alimentado de manera horizontal) se somete a un flujo de aire inclinado que hace que la fracción pesada caiga en el contenedor más cercano de la alimentación y la fracción ligera llegue a un contenedor más lejano. En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de un separador por aire.

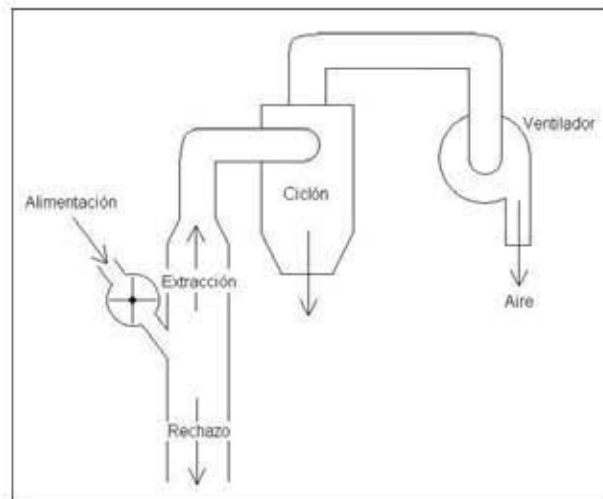


Figura 2.4. Separación por aire (Adaptada de Velsilind, 1981)

### *Cortinas móviles e inclinadas de cadenas*

En este sistema, desarrollado en Nueva Inglaterra por la empresa CR Inc., se utiliza una banda donde se colocan los residuos, los cuales se pasan a través de una cortina de cadenas móviles. Los elementos más densos logran mover las cadenas y seguir el recorrido, los más ligeros se quedan detenidos en las cadenas (Rhyner, 1995).

### ➤ *Separación por inercia*

La inercia es la resistencia de un cuerpo a cambiar su movimiento, por lo que éste principio se utiliza también para la separación de residuos sólidos.

#### *Separadores de ciclón*

En este separador se utiliza una cámara cilíndrica, donde los residuos entran de manera tangencial. Con el movimiento rotatorio, se logra que los materiales de mayor inercia permanezcan en las paredes del cilindro.

#### *Mesa vibratoria*

En una mesa inclinada, donde se colocan los residuos, se genera un movimiento de vaivén donde el movimiento en una dirección es lento y el regreso es rápido. Con esto se logra que en cierta distancia los materiales con mayor inercia se agrupen en el lado de la mesa hacia el que el movimiento es más lento y los de menor inercia hacia donde el movimiento es más rápido.

### *Separador balístico*

En este separador se utiliza un rotor para impulsar los residuos hacia el aire. Las partículas de alta densidad (y por lo tanto, alta inercia) viajan más lejos que las de baja inercia con lo que se pueden coleccionar en dos recipientes a diferentes distancias del rotor.

### ➤ *Separación magnética*

Los separadores magnéticos se han utilizado para separar materiales ferromagnéticos de otros que no lo son, pero actualmente, el separador de corriente de Eddy se ocupa para separar latas de aluminio de contenedores de plástico.

### *Separadores ferromagnéticos*

Estos separadores constan básicamente de bandas bajo el efecto de campo magnético que capturan los materiales ferromagnéticos llevándolos a contenedores más alejados y permitiendo que los materiales no ferromagnéticos caigan en contenedores cercanos. Existen separadores con magnetos permanentes o electromagnéticos. Estos separadores están disponibles en tres configuraciones, de tambores, de polea o de cinturón (Swartzbaugh, 1992).

En la Figura 2.5 se muestran los elementos de un separador ferromagnético.

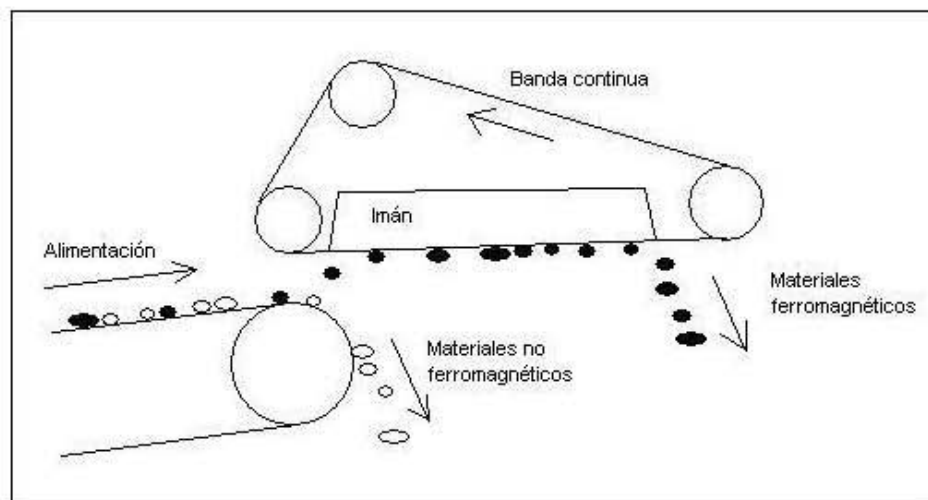


Figura 2.5 Separador ferromagnético (Adaptada de Velsilind, 1981)

### *Separador de corriente de Eddy*

Este separador se utiliza para separar metales no ferromagnéticos de materiales no metálicos. Para esto, se utilizan las corrientes de Eddy que se generan en los metales no ferromagnéticos por medio de un campo alternado, estos materiales son repelidos debido a las corrientes de Eddy que generan un campo opuesto al que las generó y pueden separarse de materiales no metálicos.

### ➤ *Separación óptica, infrarroja y rayos x*

Estas técnicas permiten separar materiales por color haciendo pasar luz a través de ellos y de acuerdo a la luz transmitida y la absorbida se puede saber el material del que se trata e inclusive el color del mismo (Rhyner, 1995).

## **2.3. Separadores de residuos por tamaño**

La separación por tamaño puede ser realizada en una o más fracciones de residuos sólidos y puede hacerse en forma seca o húmeda. La separación por tamaño se usa generalmente antes del molido, pero se puede utilizar también para regresar a la molienda los materiales que no alcanzaron ciertas dimensiones.

Como se mencionó anteriormente existen tres diseños básicos para la separación de RSM, los cuales son: superficies vibratorias, superficies giratorias o *trommel* y de discos

### **2.3.1 Criterios de diseño**

El equipo de separación por tamaño se diseña de acuerdo con el flujo de materiales (ton/h) y el tiempo de residencia en el mismo. Existen formas empíricas para el diseño de separadores por tamaño, muchas de ellas basadas en pruebas realizadas en separadores que se encuentran en uso.

Para los separadores reciprocantes se tiene la siguiente relación: (Tchobanoglous, 1993)

$$A = Q F / C_u$$

Donde:

A = área de separación (m<sup>2</sup>)

Q = capacidad (ton/h)

Cu = unidad de capacidad (ton/h·m<sup>2</sup>)

F = factor de corrección donde se engloban parámetros como el tamaño de las partículas, la eficiencia deseada, el porcentaje de área abierta, el peso específico de los materiales entre otros.

Otra fórmula sugerida es la siguiente:

$$Q_{\text{nom}} = d D^{2/3} / K$$

Donde:

Q<sub>nom</sub> = Gasto en el área abierta de placa, ton/h·m<sup>2</sup>

d = Peso específico de residuos, kg/m<sup>3</sup>

D = Ancho de apertura o diámetro, m

K = Constante experimental (adimensional)

Para diseño de separadores tipo *trommel* existen diferentes parámetros como son el diámetro, la longitud, la velocidad de giro, el ángulo de inclinación, la alimentación y la distribución de tamaños de partícula.

La velocidad rotacional es función de la velocidad crítica a la cual los materiales quedan adheridos a las paredes del separador. Para calcular la velocidad crítica se tiene la siguiente ecuación:

$$n_c = 1/2\pi (g/r)^{1/2}$$

Donde:

n<sub>c</sub> = velocidad crítica, rev/s

g = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

r = radio del *trommel*, m

La velocidad óptima ocurre cuando los residuos tienen un movimiento tipo catarata, es decir, son parcialmente subidos por la pared del separador hasta cierta altura y caen. Idealmente la velocidad de rotación debe ser el 50% de la velocidad crítica para diseños que incluyen placas verticales en el interior y 80% para casos que no consideren estas placas. Algunas velocidades reportadas se encuentran entre 10 y 18 rev/min.



El ángulo de inclinación entre la entrada y la salida del separador influye en el tiempo de residencia de los residuos. Los ángulos de inclinación reportados van de 2 a 5°. (Tchobanoglous, 1993)

En la Tabla 2.1 se presentan algunos de los parámetros típicos de un *trommel*.

Tabla 2.1 Parámetros de operación típicas de un separador tipo *trommel*

| Parámetro                        | Valor   | Unidad  |
|----------------------------------|---------|---------|
| Diámetro                         | 3.5     | m       |
| Largo de pantalla                | 4.0     | m       |
| Tamaño de pantalla               | 50      | mm      |
| Área abierta de la pantalla      | 53      | %       |
| Ángulo de inclinación (variable) | 3 – 7   | Grados  |
| Velocidad de rotación (variable) | 11 - 13 | Rev/min |

### 2.3.2 Separadores *trommel*

Se le llama *trommel* a un separador mecánico por tamaño de partícula en el cual se utiliza el movimiento rotatorio de la criba para lograr la función.

La función principal del *trommel* es separar los materiales que se alimentan en él por tamaño. Existen *trommels* que separan los materiales en dos fracciones: las que logran pasar por la criba y las que, por su mayor tamaño, se retienen. También existen separadores con este principio que separan en tres fracciones, colocando dos cribas en serie a lo largo del tambor.

Existen dos tipos de movimiento que puede generarse en el *trommel* para realizar la separación:

#### ➤ *Cascada*

Se refiere a los equipos donde los residuos son levantados por el movimiento hasta cierta altura en la que caen deslizándose sobre los residuos que se encuentran en movimiento ascendente (Figura 2.6.A)

#### ➤ *Catarata*

Cuando la velocidad del equipo es lo suficientemente alta, los residuos son lanzados al aire al abandonar la pared del mismo (figura 2.6.B) (Vesilind, 1981)

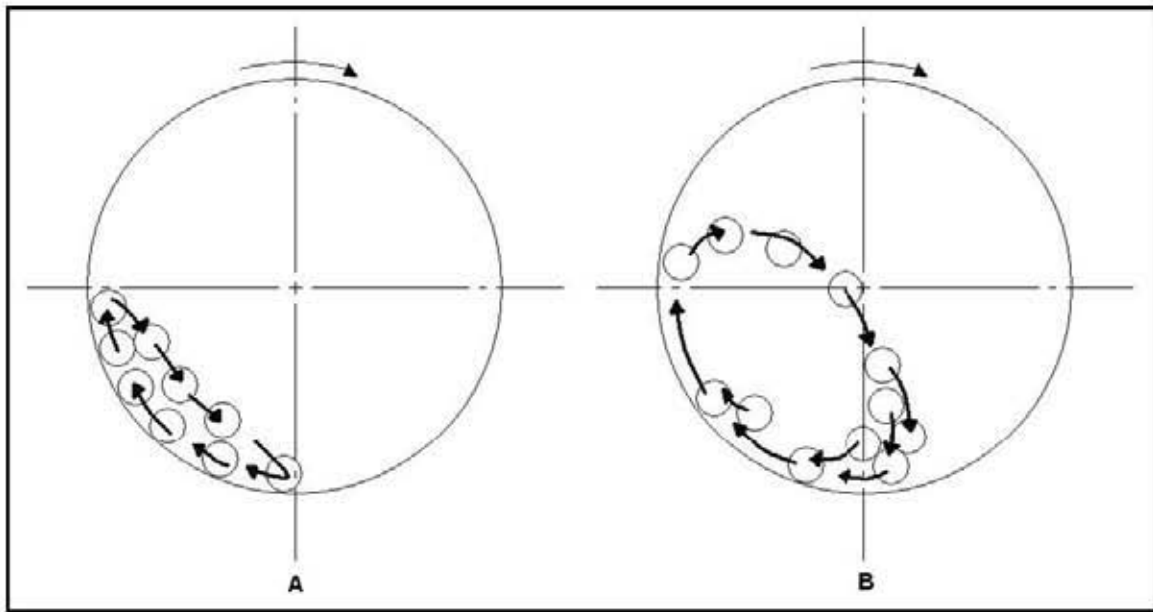


Figura 2.6 Tipos de movimiento generados en un *trommel*. (Adaptada de Velsilind, 1981)

Los separadores con movimiento de catarata generan mayor turbulencia en el flujo de residuos lo que incrementa la eficiencia en la separación. Al seguir aumentando la velocidad se llega a la velocidad crítica, donde se empieza a experimentar un tercer tipo de movimiento que es el centrífugo que no es deseable ya que disminuye la eficiencia de separación.

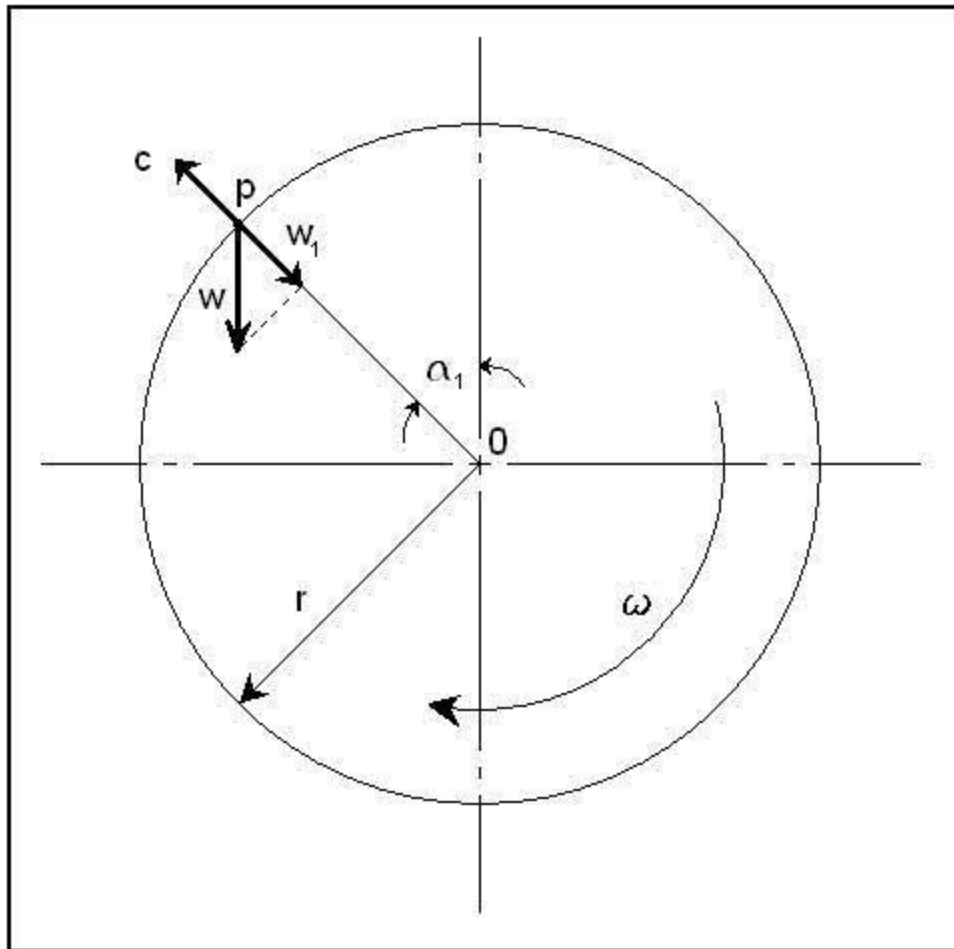


Figura 2.7 Análisis de una partícula en el separador (Adaptada de Velsilind, 1981)

Con referencia a la Figura 2.7, se considera una partícula  $p$  que se encuentra dentro del separador. Las fuerzas ejercidas sobre esta son la centrífuga,  $c$ , y la componente de su peso  $w_1$ . El ángulo entre la vertical y la línea  $Op$  es  $\alpha_1$  y  $w_1 = w \cos \alpha_1$ . Si  $c > w_1$  la partícula permanecerá en la pared del separador, si  $c < w_1$  la partícula caerá. En el punto de separación,  $c = w \cos \alpha$ , donde  $\alpha$  es el ángulo al que la separación ocurre.

La fuerza centrífuga es:

$$c = r\omega^2 / g$$

Donde:  $r$  = radio, m

$\omega$  = velocidad angular, rad/s

$g$  = aceleración de la gravedad,  $m/s^2$

$w$  = peso, kg

Combinando las ecuaciones se tiene:

$$w \cos\alpha = r\omega^2 / g$$

$$\cos\alpha = r\omega^2 / g$$

como  $\omega = 2\pi n$ , donde n es la velocidad del separador en rev/s, se tiene:

$$\cos\alpha = 4\pi^2 r n^2 / g$$

De lo anterior se observa que el ángulo  $\alpha$  al cual la partícula deja la pared del separador varía con el radio y la velocidad de rotación. El punto crítico ocurre cuando  $\cos\alpha = 1$  por lo que:

$$n_c = (g / 4\pi^2 r)^{1/2}$$

Si  $c < w_1$  en  $\alpha$ , la partícula perderá contacto con la pared y comenzará un recorrido parabólico como se muestra en la figura 2.8.

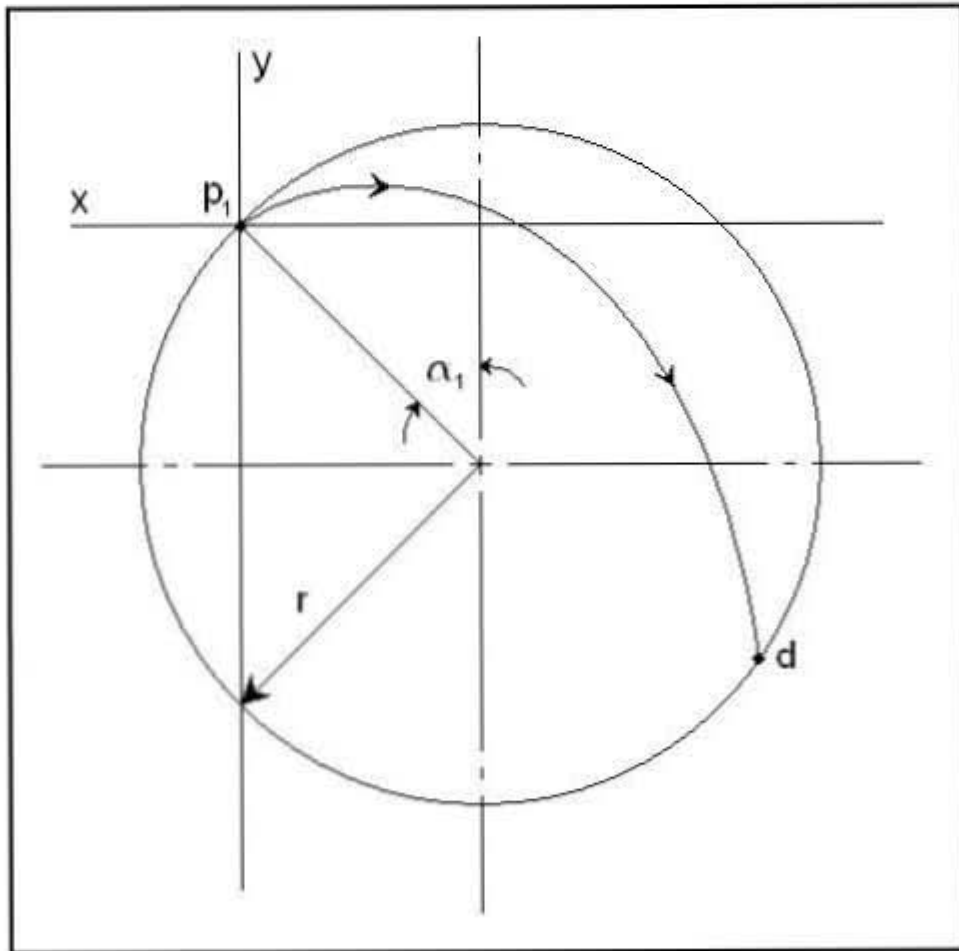


Figura 2.8 Recorrido de una partícula al perder contacto con la pared (Adaptada de Velsilind, 1981)

La ecuación de la parábola con el origen en  $p_1$  es:

$$y = x \tan \alpha - (gx^2 / 2V_1^2 \cos^2 \alpha)$$

Donde  $V_1$  = velocidad inicial de la partícula al dejar la pared, m/s

$x, y$  = coordenadas, m

$g$  = aceleración de la gravedad,  $m/s^2$

La ecuación del movimiento circular es:

$$x^2 + y^2 = (2r \operatorname{sen} \alpha)x + (2r \operatorname{cos} \alpha)y$$

La solución simultánea de las ecuaciones de los dos movimientos dan las coordenadas del punto d (en la intersección de los mismos). El punto d se encuentra en las coordenadas:

$$x = 4r \operatorname{sen} \alpha \operatorname{cos}^2 \alpha$$

$$y = -4r \operatorname{sen}^2 \alpha \operatorname{cos} \alpha$$

Una aproximación para obtener la potencia requerida en el *trommel* es la siguiente:

$$hp \approx Wr^{3/2} \{ [0.004467(1-K^3)/(1+K^2)^{1/8}] - [0.0037(1-K^5)/(1+K^2)^{3/8}] + \\ + [0.00088(1-K^7)/(1+K^2)^{5/8}] \}$$

Donde:  $W$  = Peso de la carga en el separador, lb

$r$  = radio del separador, ft

$$K = -0.024 + 0.39 (7 - 10F)^{1/2}$$

$F$  = (volumen ocupado por sólidos + volumen del aire entre los sólidos) / (volumen del separador), (adimensional) (Vesilind, 1981)

## 2.4 Separadores tipo *trommel* en México

Para conocer algunos de los equipos de separación tipo *trommel* que se encuentran en funcionamiento en México se realizaron visitas a la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) y dentro de ésta, a la Dirección Técnica; se tuvieron pláticas con el director para plantearle el proyecto y pedir información acerca de un separador que se tuvo en la dependencia. Dentro de la Dirección Técnica se encargaron de la búsqueda del equipo, el cual ya se había dado de baja de la bodega por lo que no se pudieron obtener datos acerca de su funcionamiento.

Durante la reunión se concertó visita a la planta separadora de Santa Catarina donde la Unión de Pепенadores Rafael Gutiérrez Moreno adquirió un *trommel* que se encuentra en funcionamiento.

#### **2.4.1 Equipo *trommel* en la planta de separación de Santa Catarina**

Se realizó una visita a la planta de separación de Santa Catarina donde se pudo observar el *trommel* adquirido por la unión de peпенadores que se encuentra en funcionamiento en la Ciudad de México.

La planta cuenta con cinco bandas por las que pasan los residuos, se tiene personal en cada una de las bandas que realiza la separación manual de los materiales recuperables. Básicamente se separa el PET, PEAD, vidrio y latas entre otros productos.

El *trommel* se encuentra instalado en una de las bandas se adaptaron cuchillas en la pared rotatoria, en la parte interna del separador. Por medio de estas cuchillas y durante el movimiento rotatorio se desgarran algunas de las bolsas lo que facilita la separación en la banda, posterior al *trommel*.

La líder de los peпенadores de la unión Rafael Gutiérrez Moreno explicó que la adaptación del *trommel* fue hecha por petición de la unión.

Otro problema de operación del *trommel* son los atascos debidos a la heterogeneidad de los residuos y la presencia de cintas en ellos. Esto hace que el equipo trabaje de manera intermitente.

#### **2.4.2 Equipo *trommel* en la planta de composta de Mérida, Yucatán**

En la ciudad de Mérida, el manejo de los residuos se encuentra concesionado en una parte a una empresa privada, de otra se encarga el municipio y la tercera está a cargo de la unión de peпенadores de la zona.

Dentro del programa integral de manejo de residuos, se consideró la operación de una planta de composta, para la cual se compró un separador de residuos por tamaño tipo *trommel* que actualmente se encuentra en funcionamiento.

De acuerdo con lo comentado con los encargados de los RSM en Mérida Yucatán, el mayor problema presentado en la operación del separador es el hecho de que los residuos llegan embolsados, lo que disminuye considerablemente la eficiencia de separación. Para solucionar este problema se les recomendó la adquisición de un desgarrador de bolsas, una inversión extra que no se tenía contemplada.

#### 2.4.2.1 Visita a la planta de composta de Mérida Yucatán

Los días 2 y 3 de Mayo de 2005 se llevó a cabo una visita a la planta de composta de Mérida Yucatán (Figura 2.9) donde, dentro de los equipos que se encuentran operando, se tiene un *trommel*, el cual se muestra en las Figuras 2.10 y 2.11.



Figura 2.9 Planta de composta de Mérida



Figura 2.10 *Trommel* instalado en la planta de composta de Mérida



Figura 2.11 *Trommel* instalado en la planta de composta de Mérida

#### 2.4.2.1.1. Datos obtenidos

La planta es de adquisición reciente, está diseñada para trabajar 6,000 ton/mes y tuvo un costo de \$14'000,000.00 de pesos. Actualmente se encuentra trabajando con alrededor de 1,200 ton/mes.

Los datos que se obtuvieron del *trommel* fueron los siguientes:



Marca: Seko

Diámetro del tambor: 1.79 m

Largo del tambor: 4.84 m

Inclinación: 0° (El desplazamiento de los RS dentro del separador se logra debido a la cuerda que se tiene en la parte interna. Figura 2.11)

Criba de 4"

Cuerda interna para el movimiento de los residuos de 6 hilos a lo largo del tambor.

Velocidad de giro: variable

Velocidad de alimentación: variable

Como parte de la operación de la planta no se hacen pasar objetos voluminosos a través del *trommel*, éstos son eliminados por el personal de la planta antes de cargar la banda transportadora.

#### **2.4.2.1.2. Problemas de operación**

Uno de los problemas de que se reportaron por parte del jefe de operación fue la falta de efectividad del rodillo limpiador, ya que debido a que gira en sentido inverso al tambor del *trommel* e impulsado por el mismo, no remueve los residuos que se quedan adheridos a las paredes. Muchos de estos residuos son bolsas plásticas que pueden interferir con la separación debido a que obstruyen la criba. La sugerencia que hace el personal es que el rodillo gire en la misma dirección que el tambor. En el momento de la visita se realizaba una limpieza del tambor del *trommel*, el cual se lleva a cabo una vez por semana.

El rodillo limpiador se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Rodillo limpiador del trommel

El personal de la planta reporta que no tienen problemas con la humedad de los residuos y que esto no influye con la separación de los mismos.

Como se comentó anteriormente, uno de los problemas de operación es que la mayoría de los residuos llegan embolsados lo que evita que puedan pasar a través de la criba por lo que la fracción “grande” es mayor.

En la Figura 2.13 se muestra una bolsa con residuos orgánicos que fue separada dentro de la fracción “grande” y que debió haber pasado como parte de la “pequeña”.



Figura 2.13. Residuos embolsados como parte de la fracción “grande”

Otro problema de operación que se presenta es que muchos de los residuos de la fracción “pequeña” no se depositan en la banda y caen al suelo, lo que hace que periódicamente el personal operador de la planta tenga que hacer un barrido manual en la parte inferior del *trommel*.

La decisión acerca de la velocidad que se le dará al tambor se hace por experiencia, de acuerdo a lo comentado con el personal de la planta, y tomando en cuenta la cantidad de residuos que se están separando. Se debe considerar que es la primera vez que los operadores se encargan de un *trommel* por lo que el establecimiento de las velocidades se hace de manera empírica por prueba y error lo que reduce la eficiencia del separador. De acuerdo con lo observado, los residuos dentro del *trommel* se encontraban en un movimiento tipo cascada, el cual, de acuerdo con la literatura, es de baja eficiencia. Para incrementar la eficiencia se debe tener un movimiento del tipo catarata. Al momento de hacer estas observaciones el *trommel* se encontraba girando a una velocidad de 9.84 rpm.

## **2.5 Aplicaciones de un separador de residuos por tamaño tipo *trommel* en la Ciudad de México.**

Existen diferentes aplicaciones donde un separador tipo *trommel* puede ser utilizado en el área de residuos sólidos en la Ciudad de México, las cuales se describen a continuación.

### **2.5.1. Planta de composta**

Existen alrededor de cinco plantas de composta en la Ciudad de México, pertenecientes a las delegaciones de Miguel Hidalgo, Xochimilco y Milpa Alta, también se encuentra una en Ciudad Universitaria y otra en Bordo Poniente, que aunque se encuentra localizado en el Estado de México, recibe los residuos del DF. Cuando la composta se encuentra terminada, tiene aún materiales “contaminantes” como pueden ser plásticos y papel, así como trozos de materiales compostables que por su tamaño no completaron el proceso (generalmente ramas). Para separar estos materiales de la composta se realiza un cribado o tamizado de la misma. De acuerdo con las visitas realizadas a las plantas de composta

de Ciudad Universitaria y a la de Xochimilco, el tamizado de la composta se realiza en forma manual con mallas montadas sobre marcos, en ambos casos se utilizan tambores de camas.

También se puede utilizar el *trommel* al inicio del proceso si los residuos que ingresan no tuvieron una separación previa como se utiliza en la planta de composta de Mérida, Yucatán.

En la Figura 2.14 se muestra el cribado de composta que se realiza en una planta de composta de Buenos Aires, Argentina.



Figura 2.14 *Trommel* utilizado en planta de composta en Buenos Aires

### 2.5.2. Reuso de sitios de disposición final

Debido a la falta de espacio que se tiene en la Ciudad de México y a los problemas de tipo político y social que representa la ubicación de un nuevo relleno sanitario, que por otra parte es necesario ya que, como se sabe la vida útil del relleno de Bordo Poniente está calculada para finalizar durante el 2006, se puede utilizar un separador tipo *trommel* para reusar el relleno.

La reutilización de sitios de disposición se puede lograr en lugares donde ya se llegó a una estabilización de los residuos que son degradables en un periodo “corto” de tiempo. Por medio de un separador por tamaño, se separa la materia degradada o estabilizada en forma de humus y los componentes de mayor tamaño (no degradados), como pueden ser metales, vidrio y plástico. Estos materiales se pueden llevar a un proceso de reciclaje lo

que dejaría espacio disponible en el relleno sanitario. Los materiales estabilizados se pueden reusar en el mismo relleno como material de cubierta para las nuevas celdas.

### 2.5.3. Tratamiento mecánico biológico en rellenos sanitarios

En este tratamiento se utiliza un proceso parecido al que se lleva a cabo en una planta de composta, pero el resultado buscado no es la composta en sí, sino la estabilización de los residuos orgánicos que son rápidamente degradados. El material resultante se agrega al relleno sanitario como material de cubierta, con la ventaja de que, con la degradación de estos residuos, se tiene una reducción en el volumen de los residuos a disponer.

El *trommel* se utiliza para separar la materia degradada de contaminantes como pueden ser las bolsas de plástico y pedazos de papel.

En las Figuras 2.15 y 2.16 se muestra un *trommel* instalado en un relleno sanitario de Alemania donde se utiliza para realizar la estabilización de la materia orgánica.



Figura 2.15 *Trommel* utilizado en relleno sanitario



Figura 2.16 *Trommel* utilizado en relleno sanitario

#### 2.5.4. Planta de selección de residuos sólidos

En la ciudad de México existen tres plantas separadoras de residuos sólidos: Bordo Poniente (ubicado en el Estado de México), San Juan de Aragón y Santa Catarina. El funcionamiento básico de estas plantas es el siguiente: Los residuos son depositados en bandas móviles, las cuales los transportan a través de cierta distancia. Grupos de pepenadores se encuentran a ambos lados de las bandas para separar los materiales reciclables.

Para que un material sea recuperado por los pepenadores debe cumplir con ciertas características, entre ellas el tamaño.

La instalación de un *trommel* al principio de las bandas ayuda a eliminar los residuos que, por su tamaño, no son económicamente reciclables. Dentro de estos se encuentra la materia orgánica, pero también pedazos de plástico, vidrio, papel y metales que los pepenadores no recuperan de las bandas.

En la Figura 2.17 se muestran las bandas de la planta de selección de Bordo Poniente.





Figura 2.17 Planta de selección en la Ciudad de México

### 2.5.5. Selección de la aplicación que se estudiará

En la Ciudad de México no existe el plan de reusar el relleno de Bordo Poniente, debido a que se tienen problemas de tipo político ya que los terrenos del mismo se encuentran en el Estado de México y no en el Distrito Federal, además de que de acuerdo con información dada por el gobierno del DF ya se cuentan con terrenos seleccionados para la construcción del nuevo relleno sanitario al sur de la ciudad.

De acuerdo con el PGGIRS la fracción orgánica de los residuos se llevará a plantas de composta donde se tratará para poder utilizarse como mejorador de suelos y la misma ley indica que la composta que no se utilice se dispondrá en el relleno sanitario. Por esto no es viable utilizar el *trommel* para un estabilizador de materia orgánica, ya que esta estabilización se llevará a cabo en las plantas de composta.

Por las razones expuestas anteriormente, las aplicaciones de mayor viabilidad para el *trommel* en la Ciudad de México son las plantas de composta y las plantas de selección de residuos sólidos.

De las dos opciones descritas, en este trabajo se utilizará la de la planta de selección debido a que las plantas ya se encuentran instaladas y esto facilita la obtención de datos así como el hecho de que existen mayores recursos para la instalación del *trommel* en estas plantas (como lo demuestra el que ya se cuente con uno en la planta de Santa

Catarina). Por otra parte en las plantas de composta se cuentan con menos recursos y realizan el cribado de forma manual y en los dos casos de las plantas visitadas (Ciudad Universitaria y Xochimilco) lo realizan con tambores de colchón.

Una vez seleccionada la aplicación, en el siguiente capítulo se presentan las diferentes condiciones de aplicación así como los equipos que se encuentran en el mercado.



### 3. Condiciones de aplicación y características del *trommel*

En este capítulo se analizaron las condiciones en las cuales se utilizará el *trommel* en la aplicación seleccionada, es decir, la planta de selección. Así como las características de algunos equipos que fueron revisados.

#### 3.1 Plantas de selección en la Ciudad de México

Actualmente existen tres plantas de selección en la Ciudad de México, con capacidad instalada conjunta de 6,500 toneladas por día. Las plantas están ubicadas en Bordo Poniente (Estado de México), San Juan de Aragón y Santa Catarina. En estas plantas se recuperan materiales reciclables; los que no lo son se transportan al sitio de disposición final en Bordo Poniente. Las principales características de las tres plantas se indican en la Tabla 3.1 (PGGIRS, 2004)

Tabla 3.1 Características de las plantas de selección del D.F.

| Característica                       | Bordo Poniente  | San Juan de Aragón  | Santa Catarina   |
|--------------------------------------|---|---|--|
| Ubicación                            | Prolongación Anillo Periférico s/n, Zona Federal del Lago de Texcoco. | Avenida 608 esquina Avenida 412, Col. San Juan de Aragón, Del. Gustavo A. Madero. | Kilómetro 22.5 Autopista México - Puebla, Delegación Iztapalapa. |
| Año de establecimiento               | Julio/1994  | Julio/1994  | Marzo/1996   |
| Organización a cargo de la operación | Frente Único de Pепенadores A.C.                                      | Asociación de Selectores de Desechos Sólidos de la Metrópoli A.C.                 | Unión de Pепенadores Rafael Gutiérrez Moreno A.C.                |
| Área del sitio                       | 9500 m <sup>2</sup>   | 8000 m <sup>2</sup>   | 5600 m <sup>2</sup>  |
| Sistema de pesaje                    | Báscula   | Báscula   | Báscula  |
| Capacidad instalada                  | 2,000 Ton/día   | 2,000 Ton/día   | 2,500 Ton/día  |
| Número de líneas                     | 4 líneas  | 4 líneas  | 5 líneas   |
| Capacidad por línea                  | 500 Ton   | 500 Ton   | 500 Ton  |

|                        |                                     |                                    |                                    |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Horas de trabajo       | 24 hrs./3 turnos<br>lunes a viernes | 24 hrs./3 turnos<br>lunes a sábado | 24 hrs./3 turnos<br>lunes a sábado |
| Número de trabajadores | 42 personas/línea                   | 42 personas/línea                  | 42 personas/línea                  |

La organización y operación de las plantas la realizan de manera coordinada entre la DGSU y los gremios de selectores (uniones de pepenadores).

En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de la operación de las plantas de selección (PGGIRS, 2004)

Tabla 3.2 Resumen de la operación en las Plantas de Selección del Distrito Federal

| Concepto                  | Planta                    |                               |                           |                  |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|
|                           | Bordo Poniente<br>Ton/año | San Juan de Aragón<br>Ton/año | Santa Catarina<br>Ton/año | Total<br>Ton/año |
| Cantidad que ingresa      | 650,287                   | 581,922                       | 616,890                   | 1,849,099        |
| Cantidad recuperada anual | 25,318                    | 30,363                        | 41,500                    | 97,182           |
| Tasa de recuperación (%)  | 3.9                       | 5.2                           | 6.7                       | 5.3              |

### 3.2 Residuos que se manejarán en las plantas de selección

En el Distrito Federal se generan alrededor de 12,000 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (PGGIRS, 2004)

De acuerdo con el Programa General de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (PGGIRS) del Distrito Federal, la composición promedio de los residuos es de un 43% de materia orgánica, 40% de materiales reciclables y 17 % de otros.

Los residuos que ingresarán a las plantas de selección serán la mezcla de los materiales reciclables y los otros, ya que de acuerdo con el PGGIRS, los materiales orgánicos se llevarán a las plantas de composta.

De acuerdo a los datos presentados se tiene que de las 12,000 toneladas que se producen en el Distrito Federal, 6,840 toneladas por día serán llevadas a las plantas, esto sobrepasa la capacidad instalada de las tres plantas por 340 toneladas.

Se está analizando y realizando un diagnóstico en el gobierno del DF para saber si se construirá una nueva planta de selección. (PGGIRS, 2004)

### **3.3 Condiciones de aplicación del *trommel* en la Ciudad de México**

Dentro de las condiciones de aplicación se tomarán las legales, políticas, sociales, laborales económicas y técnicas que se observan en la Ciudad de México y que pueden repercutir en la adquisición y la operación del *trommel*.

#### **3.3.1 Condiciones legales**

La Ley de Residuos sólidos del Distrito Federal plantea, en su artículo 11, los criterios que deberá seguir el gobierno para la formulación de su programa integral de manejo de residuos entre el que se encuentra “fomentar el desarrollo uso de tecnologías, métodos, prácticas y procesos de producción y comercialización que favorezcan la minimización y valorización de los residuos sólidos” (LRSDF, 2003).

De manera similar, en el artículo 2, fracción XII de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos se plantea como uno de los principios para la formulación y conducción de la política en materia de prevención, valorización y gestión integral de los residuos “la valorización, la responsabilidad compartida y el manejo integral de residuos, aplicados bajo condiciones de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos” (LGPGIR, 2003). Así mismo, marca en el artículo 9, fracción VII, entre las facultades de las Entidades Federativas el “promover, en coordinación con el Gobierno Federal y las autoridades correspondientes, la creación de infraestructura para el manejo

integral de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y residuos peligrosos, en las entidades federativas y municipios, con la participación de los inversionistas y representantes de los sectores sociales interesados” (LGPGIR, 2003).

En el Artículo 14 de la Ley de Residuos Sólidos del D.F. se plantea que “la Secretaría de Obras y Servicios, en coordinación con la Secretaría y las Secretarías de Desarrollo Económico y de Finanzas, promoverá instrumentos económicos para aquellas personas que desarrollen acciones de prevención, minimización y valorización, así como para inversión en tecnología y utilización de prácticas, métodos o procesos que coadyuven a mejorar el manejo integral de los residuos sólidos” (LRSDF, 2003).

### 3.3.2 Condiciones políticas

La Cruzada Nacional por un México Limpio es un programa de la SEMARNAT donde se aborda el tema de los residuos sólidos y de cómo mejorar el manejo que se les da actualmente.

Dentro de los propósitos de la cruzada se menciona lo siguiente “Tenemos un déficit de 68 % en infraestructura moderna y adecuada para la separación, recolección, transporte, tratamiento, reciclaje y disposición final segura de residuos municipales. El manejo de la basura se asocia con riesgos a la salud; hace falta capacitación, entrenamiento y equipo especializado para involucrarse de forma segura con este oficio.” (SEMARNAT, 2005)

Dentro de los cuatro componentes principales de la cruzada se encuentran los siguientes: “La elaboración del primer Programa Nacional para el Manejo Integral de Residuos Sólidos municipales, industriales y peligrosos, que permitan unir y coordinar los esfuerzos de los tres niveles de gobierno y los distintos sectores de la sociedad y el fomento y apoyo para la construcción de infraestructura y el equipamiento que permitan minimizar, recolectar, transportar, tratar, reciclar y disponer en forma segura los residuos sólidos en todo el país” (SEMARNAT, 2005)

En el Programa General de Gestión Integral de Residuos Sólidos del D.F, dentro de sus principios rectores se encuentra el Principio de autosuficiencia donde se “Demanda que se debe contar con la infraestructura y equipamiento necesarios para asegurar que los residuos sólidos que se generen, se manejen de manera ambientalmente adecuada en el territorio del

Distrito Federal” (PGGIRS, 2004). Además establece que “entre los instrumentos considerados en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, los Planes de Manejo para los diversos tipos de generadores presentes en la ciudad, son el principal medio a través del cual se obtendrá información que fortalecerá el manejo integral de los residuos, la responsabilidad compartida entre productores, distribuidores, comercializadores y consumidores en la reducción de la generación de los residuos sólidos, así como la creación de infraestructura y equipamiento para el manejo, tratamiento y disposición final de los mismos”. (PGGIRS, 2004)

### 3.3.3 Condiciones sociales

En el caso de que el *trommel* se instalara en las plantas de composta existentes, la operación quedaría a cargo de personal del gobierno del DF. Para la operación de las nuevas se puede suponer que sería el mismo gobierno el que las operara por lo que el personal que laborará en las mismas puede ser asignado de acuerdo a la preparación que se requiera.

Para el caso de que el *trommel* se instalara en las plantas de selección, se encontraría a cargo de los grupos de pepenadores que se encargan de la operación de las mismas, por lo que es importante conocer su organización social, así como su preparación.

La situación social de los grupos que se encargan de la separación y selección de los residuos es muy compleja y ha dado origen a diferentes investigaciones por parte de profesionistas que se han especializado en esto. Uno de los ejemplos más conocidos es el del Dr. Héctor Castillo Berthier, del Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM que vivió una temporada de alrededor de tres meses como pepenador para conocer toda la problemática social que se tiene dentro del ambiente de los pepenadores. (Berthier, 1983)

Los grupos que se encargan del reaprovechamiento de los residuos son conocidos como uniones de pepenadores. Antes del 19 de marzo de 1987, el liderazgo de la gran mayoría de los pepenadores estaba concentrado en Rafael Gutiérrez Moreno, el cual, de acuerdo con el Dr. Castillo Berthier, estableció un cacicazgo y era conocido como el “zar de la basura”. A partir del 19 de marzo de 1987, fecha en que el líder fue asesinado, los pepenadores se dividieron en diferentes grupos.

De acuerdo con el personal de la Dirección General de Servicios Urbanos y refiriéndose a las tres plantas seleccionadoras que existen en la Ciudad de México –Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina- son tres las uniones o grupos de pepenadores que las operan y no tienen relaciones entre sí. Económicamente hablando, es más factible para el gobierno tener una sola planta de selección pero se construyeron tres para evitar una sola unión de pepenadores que pueda tener mayor poder por la cantidad de personas que representaría. (López, 2005) Además si se cuenta con diferentes plantas de selección se pueden llevar los residuos a la más cercana del sitio de interés lo que representa una ventaja en tiempos y costos de transporte.

Dentro del relleno controlado de Neza I, se tuvo la oportunidad de hablar con uno de los miembros del grupo dirigente de los pepenadores, el cual mencionaba que existe un líder que junto con su familia se encarga de la compra de los materiales recuperados dentro del relleno.

Muchos de los pepenadores se encuentran dedicados a esta actividad por generaciones y el nivel de educación en los grupos es muy bajo.

#### **3.3.4 Condiciones laborales**

Las plantas de selección de la Ciudad de México son operadas por las uniones de pepenadores, pero todo el mantenimiento y los gastos de operación (sin tomar en cuenta el personal) corren a cargo del gobierno del D.F.

Estas uniones no son contratadas por el gobierno sino que reciben las plantas como parte de la infraestructura que el gobierno implementa para reducir los residuos que se envían a disposición final en el relleno sanitario de Bordo Poniente.

En el caso de que la iniciativa privada se involucrara en el campo de las plantas de selección, posibilidad que por cuestiones sociales se presenta complicada, las condiciones laborales serían diferentes ya que las ganancias de los materiales recuperados serían para la empresa y los seleccionadores serían personal asalariado y posiblemente tendría un mayor nivel educativo.

### 3.3.5 Condiciones económicas

En el Programa General de Gestión Integral de Residuos Sólidos del D.F se menciona la necesidad de invertir recursos para incrementar la eficiencia de separación en las plantas de selección y para lo mismo se plantea un costo estimado de \$90,000,000 de pesos para las tres plantas existentes –Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina- (PGGIRS, 2004)

### 3.3.6 Condiciones técnicas

Para el caso de la instalación del *trommel* en plantas de selección se requerirá de un equipo que maneje 500 ton/día de residuos que es lo que se maneja en cada una de las bandas que se encuentran actualmente instaladas.

El *trommel* no requiere movilidad debido a que se instalaría en la parte inicial de cada banda de forma fija. Por esto mismo se requiere que el *trommel* seleccionado tenga una forma de carga y descarga compatible con el sistema de bandas que se encuentra instalado en las plantas de selección.

De acuerdo con los datos obtenidos de la Dirección General de Servicios Urbanos, la velocidad de las bandas de selección es de 0.35 m/s, de acuerdo con la capacidad de carga, el espesor de los residuos en la banda puede ir de 0.2 a 5.2 m, pero para que la eficiencia de separación sea mayor, la banda debe contener una altura baja de residuos que asegurarán que los seleccionadores tengan acceso a los diferentes materiales, por lo anterior se considerará un espesor de 0.2 m (espesor aproximado observado en la planta de selección de Bordo Poniente). Se considerará un ángulo de reposo de los residuos es de 30° y el ancho de las bandas es de 1.22 m. Con los datos anteriores se tiene que el volumen a manejar por el *trommel* es de 0.061 m<sup>3</sup>/s (220.14 m<sup>3</sup>/h).

Durante la visita realizada a la planta de selección de Bordo Poniente se pudo observar que los residuos que pueden causar daños a las bandas, como serían los voluminosos, de madera o metálicos, o los que tienen puntas se retiran de manera manual, por lo que se podría seguir con esta práctica y evitar que este tipo de residuos llegue al *trommel*.

La operación del *trommel* debe ser sencilla tomando en cuenta que los operadores son parte de las uniones de pepenadores que se encuentran a cargo de las plantas.

Se debe tener el mínimo de requerimientos de servicios externos para evitar instalaciones complicadas, y asegurar una operación sencilla.

El equipo seleccionado deberá contar con un sistema de apertura de bolsas ya que es uno de los principales problemas que se presentan en la Ciudad de México.

Para el caso de que el *trommel* se instale en las plantas de composta se deberá conocer la cantidad de composta considerada en el diseño para conocer el volumen que manejará el *trommel* y así proponer sus dimensiones.

Para la planta de composta sería adecuado que el *trommel* tuviera un sistema para poder moverse o remolcarse, debido a que se podría colocar en diferentes sitios dependiendo de los requerimientos y de las posiciones de las pilas. La movilidad del *trommel* podría suplirse con un sistema de bandas.

### **3.4 Características de equipos *trommel* analizados**

En el Anexo A se muestra una lista de las empresas proveedoras de *trommel* que se encontraron en el mercado y a las cuales se solicitó información. De las empresas listadas en el Anexo A se recibió respuesta de cuatro de ellas, una de las cuales sólo envió un video del cual no se pueden obtener datos técnicos. Se obtuvo información de 12 equipos que se enlistan en la Tabla 3.3.



Tabla 3.3 Características de equipos *trommel* analizados

| Marca    | Modelo        | Motor              | Capacidad   | Dimensiones            | Criba          | Sistema de limpieza                   | Fijo o móvil | Alimentación   | Descarga                     | Extras                           |
|----------|---------------|--------------------|---|------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------|----------------|------------------------------|----------------------------------|
| Wildcat  | 510<br>Cougar | Diesel, 49 HP      |   | D 5' L 10'             | Intercambiable | Cepillo ajustable desde nivel de piso | Móvil        | Central        | Bandas por ambos extremos    |                                  |
| Wildcat  | 516<br>Cougar | Diesel, 65 HP      | 100 yd <sup>3</sup> /h<br>(76.5m <sup>3</sup> /h) | D 5' L 16'             | Intercambiable | Cepillo ajustable desde nivel de piso | Móvil        | Central        | Bandas por ambos extremos    | Control remoto, bandas plegables |
| Wildcat  | 626<br>Cougar | Diesel, 125 HP     | 200 yd <sup>3</sup> /h<br>(153 m <sup>3</sup> /h) | D 5' L 21'             | Intercambiable | Cepillo ajustable desde nivel de piso | Móvil        | Central        | Bandas por ambos extremos    | Control remoto, bandas plegables |
| Komptech | 1440          | Eléctrico, 11 KW   | 70 m <sup>3</sup> /h                              | D 1450 mm<br>L 4000 mm |                | Barras antiadherentes                 | Fijo         | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |                                  |
| Komptech | 1845          | Eléctrico, 15 KW   | 100 m <sup>3</sup> /h                             | D 1800 mm<br>L 4500 mm |                | Barras antiadherentes                 | Fijo         | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |                                  |
| Komptech | 2055          | Eléctrico, 18.5 KW | 150 m <sup>3</sup> /h                             | D 2000 mm<br>L 5500 mm |                | Barras antiadherentes                 | Fijo         | Por un extremo | Por extremo y                |                                  |

|                    |           |                          |                       |                         |                           |                       |       |                |                              |  |
|--------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-------|----------------|------------------------------|--|
|                    |           |                          |                       |                         |                           |                       |       |                | parte inferior               |  |
| Komptech           | 2278      | Eléctrico, 22 KW         | 200 m <sup>3</sup> /h | D 2200 mm<br>L 7800 mm  |                           | Barras antiadherentes | Fijo  | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |  |
| Komptech           | 2590      | Eléctrohidráulico, 30 KW | 230 m <sup>3</sup> /h | D 2500 mm<br>L 9000 mm  |                           | Barras antiadherentes | Fijo  | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |  |
| Komptech           | 25120     | Eléctrohidráulico, 37 KW | 230 m <sup>3</sup> /h | D 2500 mm<br>L 12000 mm |                           | Barras antiadherentes | Fijo  | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |  |
| The screen machine | 621T      | Disel, 110 HP            |                       | D 6' L 21'              | Intercambiables por clamp |                       | Móvil | Por un extremo | Por extremo y parte inferior | Control remoto, bandas incluidas de velocidad variable |
| The screen machine | Archiever | Diesel                   |                       | 5`x11`                  |                           |                       | Móvil | Por un extremo | Por extremo y parte inferior | Ángulo ajustable, incluye Molino                       |

|                    |       |        |  |        |  |  |       |                |                              |  |
|--------------------|-------|--------|--|--------|--|--|-------|----------------|------------------------------|--|
|                    |       |        |  |        |  |  |       |                |                              | de martillos, especial para composta                                     |
| The screen machine | Might | Diesel |  | 5`x11` |  |  | Móvil | Por un extremo | Por extremo y parte inferior | Velocidad ajustable, incluye Molino de martillos, especial para composta |

### 3.5 Selección del separador más adecuado para el trabajo en las condiciones de la Ciudad de México

Como se comentó anteriormente, el *trommel* se seleccionará para la aplicación en una planta de selección de RSM.

Las condiciones técnicas que se tienen para el *trommel* son las siguientes.

Volumen a manejar: 220.14 m<sup>3</sup>/h

No se requiere movilidad del *trommel*

Carga por uno de los extremos

Descarga de fracción “grande” por el extremo restante

Descarga de fracción “pequeña” por parte inferior

No es necesario el control remoto ya que la operación debe ser sencilla

Debido a que ninguno de los equipos incluye un sistema para abrir las bolsas no se tomará en cuenta para la selección

Con las condiciones enlistadas y de acuerdo con los equipos que se describen en la Tabla 3.3 “Características de equipos *trommel* analizados” se presenta la Tabla 3.4, en la cual se somborean los campos de los equipos que no cumplen con las condiciones técnicas.

Tabla 3.4 Cumplimiento de los *trommel* analizados con las condiciones técnicas

| Marca    | Modelo        | Motor            | Capacidad   | Dimensiones            | Criba          | Sistema de limpieza                   | Fijo o móvil | Alimentación   | Descarga                     | Extras                           |
|----------|---------------|------------------|---|------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------|----------------|------------------------------|----------------------------------|
| Wildcat  | 510<br>Cougar | Diesel, 49 HP    |   | D 5' L 10'             | Intercambiable | Cepillo ajustable desde nivel de piso | Móvil        | Central        | Bandas por ambos extremos    |                                  |
| Wildcat  | 516<br>Cougar | Diesel, 65 HP    | 100 yd <sup>3</sup> /h<br>(76.5m <sup>3</sup> /h) | D 5' L 16'             | Intercambiable | Cepillo ajustable desde nivel de piso | Móvil        | Central        | Bandas por ambos extremos    | Control remoto, bandas plegables |
| Wildcat  | 626<br>Cougar | Diesel, 125 HP   | 200 yd <sup>3</sup> /h<br>(153 m <sup>3</sup> /h) | D 5' L 21'             | Intercambiable | Cepillo ajustable desde nivel de piso | Móvil        | Central        | Bandas por ambos extremos    | Control remoto, bandas plegables |
| Komptech | 1440          | Eléctrico, 11 KW | 70 m <sup>3</sup> /h                              | D 1450 mm<br>L 4000 mm |                | Barras antiadherentes                 | Fijo         | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |                                  |
| Komptech | 1845          | Eléctrico, 15 KW | 100 m <sup>3</sup> /h                             | D 1800 mm<br>L 4500 mm |                | Barras antiadherentes                 | Fijo         | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |                                  |
| Komptech | 2055          | Eléctrico, 18.5  | 150 m <sup>3</sup> /h                             | D 2000 mm              |                | Barras                                | Fijo         | Por un extremo | Por                          |                                  |

|                    |           |                          |                       |                         |                           |                       |       |                |                              |  |
|--------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-------|----------------|------------------------------|--|
|                    |           | KW                       |                       | L 5500 mm               |                           | antiadherentes        |       |                | extremo y parte inferior     |  |
| Komptech           | 2278      | Eléctrico, 22 KW         | 200 m <sup>3</sup> /h | D 2200 mm<br>L 7800 mm  |                           | Barras antiadherentes | Fijo  | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |  |
| Komptech           | 2590      | Eléctrohidráulico, 30 KW | 230 m <sup>3</sup> /h | D 2500 mm<br>L 9000 mm  |                           | Barras antiadherentes | Fijo  | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |  |
| Komptech           | 25120     | Eléctrohidráulico, 37 KW | 230 m <sup>3</sup> /h | D 2500 mm<br>L 12000 mm |                           | Barras antiadherentes | Fijo  | Por un extremo | Por extremo y parte inferior |  |
| The screen machine | 621T      | Disel, 110 HP            |                       | D 6' L 21'              | Intercambiables por clamp |                       | Móvil | Por un extremo | Por extremo y parte inferior | Control remoto, bandas incluidas de velocidad variable |
| The screen machine | Archiever | Diesel                   |                       | 5' x 11'                |                           |                       | Móvil | Por un extremo | Por extremo y parte          | Ángulo ajustable, incluye                              |

|                    |       |        |  |        |  |  |       |                |                              |  |
|--------------------|-------|--------|--|--------|--|--|-------|----------------|------------------------------|--|
|                    |       |        |  |        |  |  |       |                | inferior                     | Molino de martillos, especial para composta                              |
| The screen machine | Might | Diesel |  | 5`x11` |  |  | Móvil | Por un extremo | Por extremo y parte inferior | Velocidad ajustable, incluye Molino de martillos, especial para composta |

Descartando los equipos que por alguna razón no cumplen con las condiciones técnicas, la selección se reduce a dos equipos de la marca Komtech, entre los cuales las principales diferencias son la potencia del motor y las dimensiones.

De los equipos se seleccionó el modelo 2590 debido a que cumple con la capacidad de volumen requerida y requiere de menor potencia para su funcionamiento, lo que representará un ahorro de energía durante su operación en comparación con el modelo 25120.

El equipo seleccionado presenta la desventaja de no contar con un sistema para abrir las bolsas, que es una de las condiciones que se tienen en la ciudad de México.

### **3.6 Precio de los equipos comerciales**

Aunque se solicitó el precio del equipo seleccionado no se recibió respuesta, pero de acuerdo con los representantes de Seko, marca de la planta de composta instalada en Mérida, el costo del *trommel* ubicado en dicha planta es de \$1`500,000.00 pesos.

Una vez discutidas las condiciones de aplicación del *trommel* y seleccionado el equipo comercial que podría aplicarse en el DF se procedió a realizar el diseño conceptual para mejorar la operación del mismo en las condiciones de la Ciudad de México, lo que se tratará en el siguiente capítulo.



## 4. Diseño Conceptual

En este capítulo se presenta información acerca de las plantas de selección y la tecnificación inicial y total de una planta para indicar el lugar que ocuparía el *trommel* dentro de las mismas. Con el fin de mejorar la eficiencia de separación, es conveniente que en la Ciudad de México se inicie la tecnificación básica con los equipos sugeridos en este capítulo que requiere una baja inversión, mientras que una planta de selección completamente tecnificada requiere equipos muy sofisticados y de alto costo. También se presenta el diseño conceptual del separador propuesto que fue basado en el *trommel* seleccionado en el capítulo anterior.

### 4.1 Planta de selección de residuos sólidos municipales

De acuerdo con los datos obtenidos en la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) del Distrito Federal, en las plantas de selección se separan principalmente los siguientes materiales: papel (periódico, revista, bond, archivo); cartón; plástico (PET, PEAD, PEBD, PVC, PP, PS), vidrio entero y roto (*cullet*), separado por color café, transparente, verde, rosa o azul; pan y tortilla; llantas; lata de aluminio y de hojalata; lámina; metales ferrosos y no ferrosos; árbol de Navidad y artículos misceláneos.

De los materiales mencionados se eliminarán los árboles de navidad, así como el pan y la tortilla, ya que de acuerdo con la Ley de residuos sólidos del DF entran dentro de la división de residuos orgánicos y no deberán llegar a las plantas de selección.

De acuerdo con el estudio realizado por la Ing. Carolina Beras Cuello (Beras, 2006) quien investigó las formas de separación de los residuos en la Ciudad de México, los materiales que se comercializan en esta ciudad son: papel, cartón, PET, PEAD, vidrio, metales ferrosos y no ferrosos, por lo que son los que se recuperan de forma rentable en las plantas separadoras.

Con lo anterior y para definir el tren de separación de la planta, se considerará que se deben separar los materiales que se enlistan a continuación.

1. Papel
2. Cartón

3. PET
4. PEAD
5. Vidrio
6. Metales ferrosos
7. Metales no ferrosos

**4.1.1 Planta de selección tecnificada**

De acuerdo a la Ley de residuos sólidos del DF no deberán llegar residuos orgánicos a las plantas de selección por lo que no se consideran en el diseño de la planta de selección tecnificada ya que ésta se podría implementar en la Ciudad de México en un futuro lejano debido a las condiciones (sobre todo económicas) imperantes en la actualidad.

El tren de separación que se propone para la planta tecnificada se muestra en la Figura 4.1.

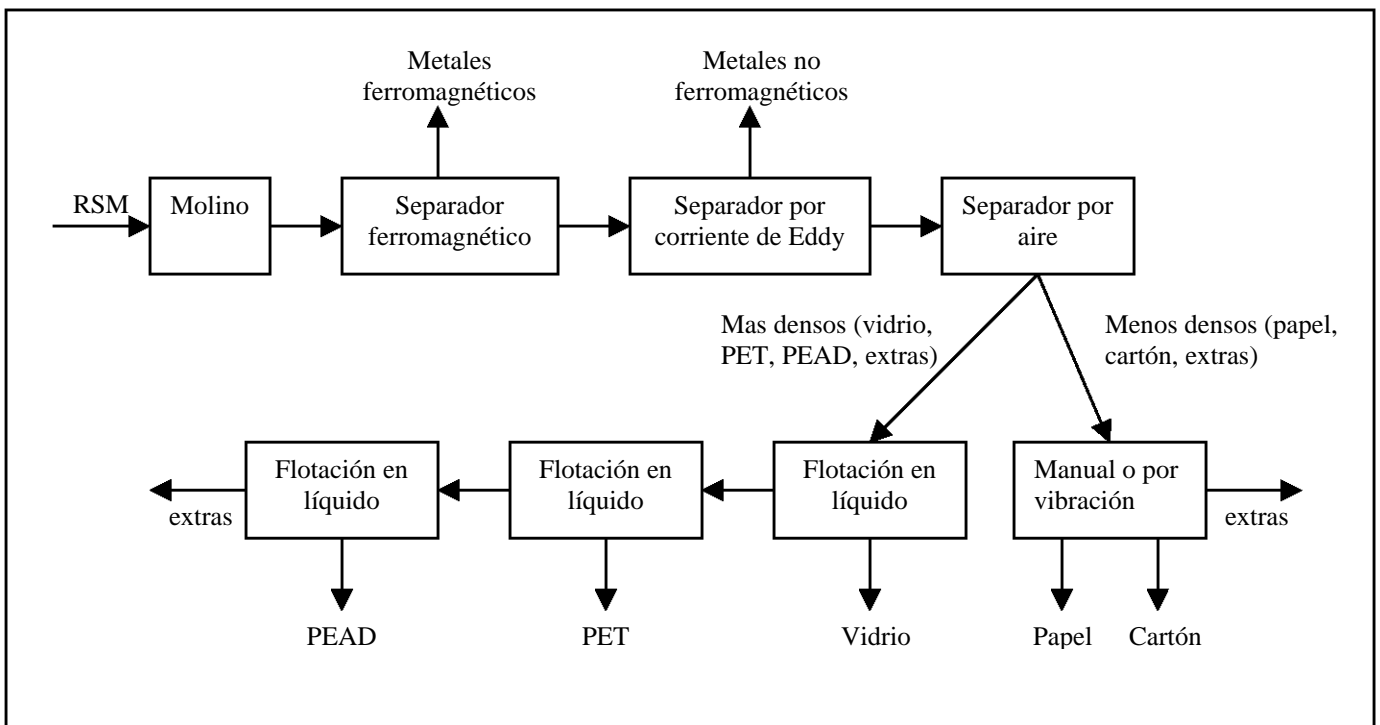


Figura 4.1 Tren de separación de residuos tecnificada

### 4.1.2 Planta de selección actualmente utilizada en el DF

Las tres plantas de selección que se encuentran actualmente instaladas en la Ciudad de México se basan en la mano de obra en combinación con bandas mecánicas, ya que la selección se hace por medio de personas que separan los materiales deseados.

En la Figura 4.2 se muestra el arreglo de las bandas que se utilizan en estas plantas.

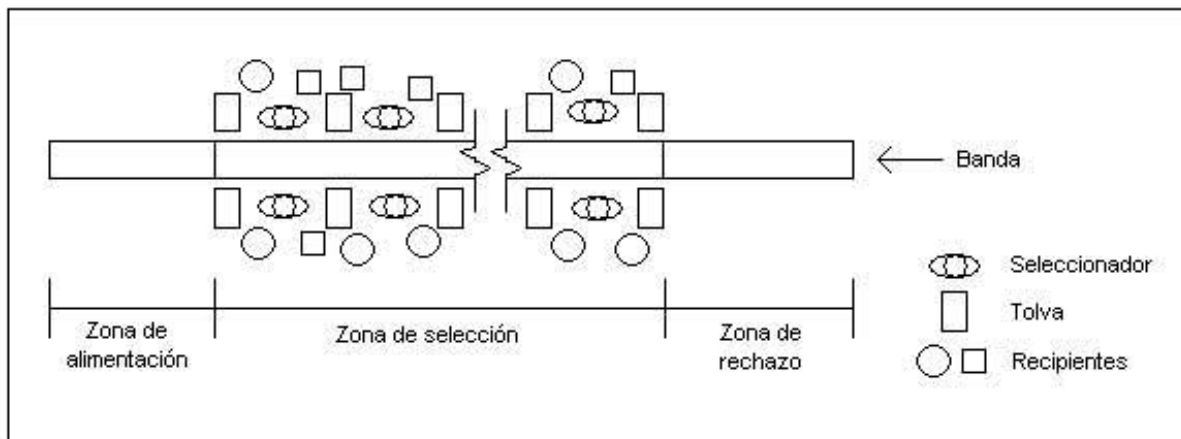


Figura 4.2 Arreglo de las bandas en las plantas de selección instaladas en el DF

### 4.1.3 Propuesta de tecnificación inicial de las plantas del DF

Las plantas de selección en el DF, además de haber sido creadas para reducir la cantidad de residuos que llegan al sitio de disposición final, se planearon como una solución al problema social que planteaban los grupos de pepenadores que requerían de una actividad remunerada a la cual dedicarse. Por lo anterior no se puede pensar en una planta de selección donde no se utilice mano de obra ya que esto dejaría sin trabajo a los pepenadores que conforman las uniones que operan las plantas.

Se propone colocar únicamente los separadores que hagan más eficiente la separación manual que actualmente se realiza.

Para lo anterior se considerará la colocación de separadores que lograrían aumentar la eficiencia de la separación sin desplazar la mano de obra utilizada actualmente. Los equipos propuestos son un *trommel* al inicio de la banda y un molino y un separador de ferromagnéticos al final de la misma. Esto eliminaría de las bandas los residuos que por su

tamaño no son recuperados, el molino ayudaría a reducir el volumen de los materiales que serán enviados a disposición final y de los residuos molidos se separarán los ferromagnéticos que son fácilmente reciclables.

En el caso de los residuos orgánicos que lleguen a las plantas de selección (hasta la aplicación de la separación definida en la Ley de residuos sólidos del DF al cien por ciento de la población) serían eliminados en su mayoría en el *trommel* debido a su menor tamaño. La configuración propuesta se muestra en la Figura 4.3.

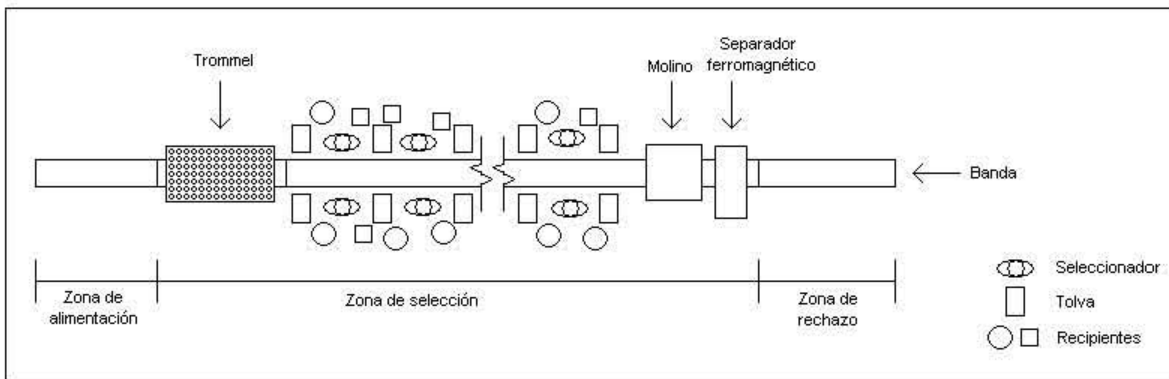


Figura 4.3 Configuración propuesta para la tecnificación inicial de las plantas de selección.

Una vez explicada la función que tendría el *trommel* en una tecnificación inicial de las plantas de selección, se realizó el diseño conceptual del mismo.

#### 4.2 Diseño conceptual del *trommel*

El diseño conceptual es una etapa del diseño mecánico, en la cual se tiene una propuesta de solución, pero no se llega al diseño de detalle en el que se realizan planos de fabricación de cada componente diseñado, además de efectuar una selección de materiales de los mismos.

El diseño conceptual consta de diferentes pasos, los cuales se definen a continuación:

1. Reconocimiento de necesidades

Una necesidad surge de la inquietud de que está ocurriendo algo en forma equivocada, de que se puede mejorar o se puede hacer algo en forma diferente para obtener beneficios. Durante esta etapa se deben reconocer las necesidades.

2. Definición de especificaciones

Una vez reconocidas las necesidades se deben definir las especificaciones que el equipo a diseñar debe cumplir para satisfacer las necesidades encontradas.

3. Definición de función principal

Se debe definir cual es la función principal que se debe cumplir, en esta etapa es de gran ayuda el encontrar los estados inicial y final y representar el sistema como una caja negra.

4. Definición de sistemas

La función principal se divide en sistemas para facilitar el diseño.

5. Alternativas de solución de sistemas

Se dan alternativas de solución para cada sistema y se hacen combinaciones de las diferentes alternativas.

6. Selección de alternativas de solución de los sistemas

Se selecciona la alternativa de solución que se desarrollará.

7. Diseño conceptual

Se realiza el diseño conceptual de los elementos que cumplan los diferentes sistemas, de forma que cumplan con la función principal.

#### 4.2.1 Reconocimiento de necesidades

Las necesidades que deberá cumplir el *trommel* y que se encontraron de acuerdo con las observaciones hechas en campo y las entrevistas son las siguientes:

- a. Que maneje el flujo requerido
- b. Que separe los RSM en dos fracciones de acuerdo a su tamaño
- c. Fácil manejo
- d. Seguro para los usuarios
- e. Que los orificios no se bloqueen
- f. Que sea de fácil limpieza
- g. Contención de residuos “pequeños” hasta zona de descarga
- h. Que abra bolsas
- i. Económico

### 4.2.2 Definición de especificaciones

Con la información obtenida acerca de las necesidades se plantean las especificaciones de diseño. Las especificaciones se encuentran dando a las necesidades una métrica o sistema con el cual se medirán y un valor numérico con el cual se puede calificar el resultado final del diseño.

En la Tabla 4.1 se muestran las diferentes especificaciones con métrica y valor.

Tabla 4.1. Especificaciones con métrica y valor

| <b>Especificación</b>  | <b>Métrica</b>                            | <b>Valor</b> |
|--|---|--------------|
| El sistema separa los RSM en dos fracciones de acuerdo a su tamaño | Eficiencia de separación                  | %<br>0-100   |
| El sistema es seguro para los usuarios                             | Riesgo de accidente                       | 1-5          |
| El sistema maneja el flujo requerido                               | m <sup>3</sup> /h                         | 220.14       |
| El sistema es económico  | Pesos                                     |              |
| El sistema es de fácil manejo                                      | Especialización del usuario               | 1-5          |
| En el sistema los orificios no se bloquean                         | Bloqueo de orificios en operación         | %<br>0-100   |
| El sistema abre las bolsas   | Bolsas abiertas en operación              | %            |
| El sistema es de fácil limpieza                                    | Requerimientos de limpieza                | 1-5          |
| El sistema evita que los residuos “pequeños” se derramen al suelo  | Caída de residuos “pequeños” en operación | %<br>0-100   |

### 4.2.3 Definición de función principal

La función principal es la de separar los residuos por tamaño, en la Figura 4.4 se muestra el diagrama de caja negra del sistema.

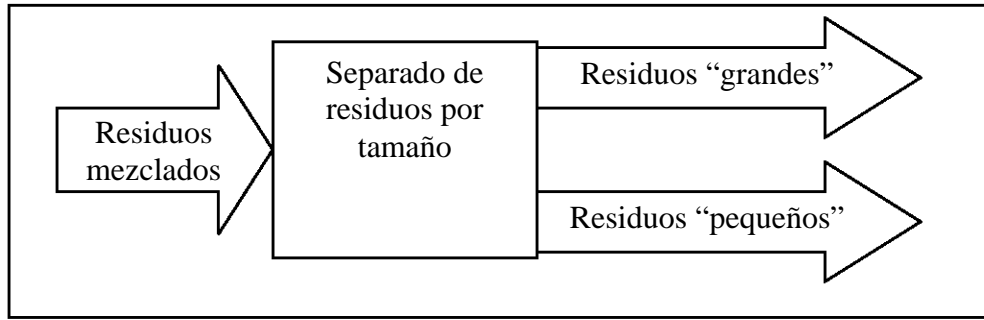


Figura 4.4 Diagrama de caja negra

#### 4.2.4 Definición de sistemas y alternativas de solución

Para continuar con el diseño se divide la función general de “separar residuos por tamaño” en los sistemas que se enlistan a continuación.

*Sistemas.*

1. Separado de residuos (S)
2. Traslado de residuos dentro del separador (T)
3. Evitar bloqueo de orificios (D)
4. Abrir bolsas (AB)

En la Figura 4.5 se muestra la relación que existe entre los sistemas, así como las entradas y salidas de cada uno de ellos.

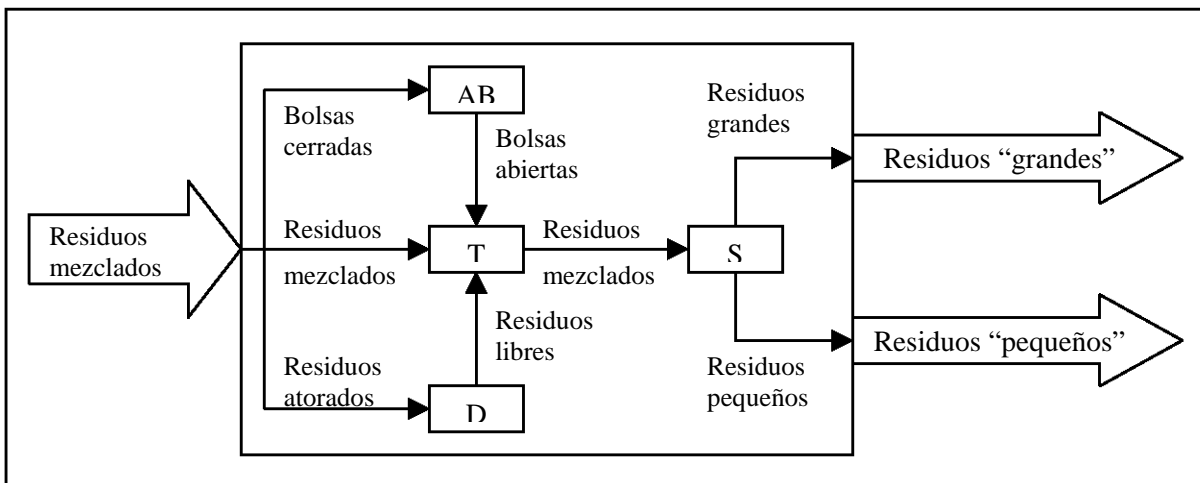
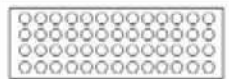

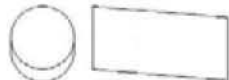
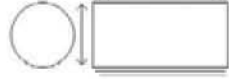


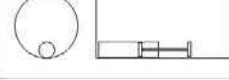




Figura 4.5 Relación entre sistemas

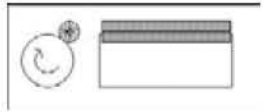
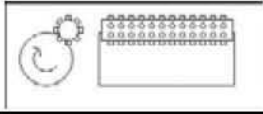
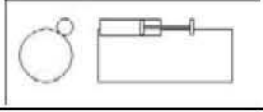
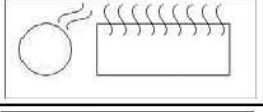
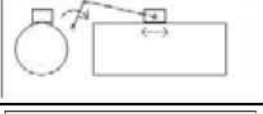
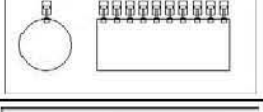

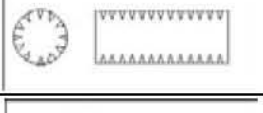
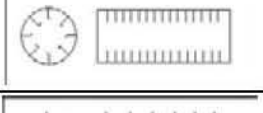
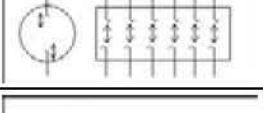
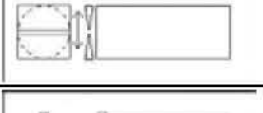
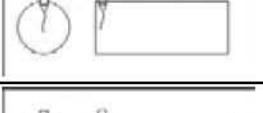
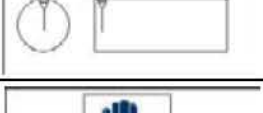

En la Tabla 4.2 se muestra la matriz morfológica, en la cual se enlistan las diferentes alternativas que se tienen para realizar cada una de los sistemas.

Se considerará que la función de separar se realizará de forma mecánica y por medio de una criba debido a que el diseño se basará en un separador *trommel*, cuyo principio de separación es el mencionado.

Tabla 4.2. Matriz morfológica

| Función principal           | Sistemas                      | Alternativas           |   |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------|---|
| Separar residuos por tamaño | Separado                      | Criba                  |    |
|                             | Traslado dentro del separador | Cuerda                 |    |
|                             |                               | Gravedad (Inclinación) |    |
|                             |                               | Vibración              |  |
|                             |                               | Cadenas                |  |
|                             |                               | Cadenas con paletas    |  |
|                             |                               | Pistón                 |  |
|                             |                               | Por fluido             |  |
|                             |                               | Mecanismo              |  |
|                             |                               | Desbloqueo             | Cepillo móvil   |



|                    |                         |  |
|--------------------|-------------------------|--|
|                    | Cepillo fijo            |    |
|                    | Contraparte de agujeros |    |
|                    | Pistón                  |    |
|                    | Por fluido              |    |
|                    | Mecanismo               |    |
|                    | Actuadores individuales |    |
|                    | Vibración               |   |
| Apertura de bolsas | Cuchillas               |  |
|                    | Ganchos                 |  |
|                    | Ganchos móviles         |  |
|                    | Cuchillas móviles       |  |
|                    | Chorro de agua          |  |
|                    | Laser                   |  |
|                    | Manual                  |  |

### 4.2.5 Selección de métodos

Para la escoger los métodos que se aplicarán para cada sistema se utilizarán matrices de selección, para lo cual se deben definir los parámetros que deberán cumplir las diferentes alternativas.

#### 4.2.5.1 Definición de los parámetros para la selección del método de cada sistema

Para poder seleccionar los métodos a emplear en cada subsistema se definieron parámetros de decisión, y a cada uno se le asignó cierto peso mediante una matriz de factor de peso. Para poder realizar esta matriz es necesario describir los parámetros para poder entender su importancia.

Debido a que para la separación de los residuos sólo se tomará en cuenta la opción de criba, no existen parámetros para su selección.

A continuación se describen los parámetros para cada subsistema. Algunos de los parámetros se utilizarán para evaluar más de un subsistema por lo que únicamente se describen la primera vez que aparecen.

#### *Traslado dentro del separador*

1. Sencillez

Se refiere a que la solución debe requerir de los menos servicios externos posibles.

2. Costo

Este parámetro está relacionado con el número de los elementos del subsistema y el costo de cada uno, así como los requerimientos de mantenimiento

3. Interferencia con el movimiento de los residuos

Se refiere a que los elementos del subsistema no cambien el movimiento rotatorio de los residuos ya que este movimiento es por el cual se lleva a cabo la separación.

4. Interferencia con la separación

Hace referencia a que el sistema de desbloqueo interfiera con la separación de los residuos en alguna forma.

5. Facilidad de operación

Se refiere a que el usuario tenga la menor interferencia posible con el subsistema

6. Facilidad de limpieza

Este parámetro está relacionado con la cantidad de elementos que requerirán limpieza y las formas de los mismos, lo que puede dificultar la limpieza

7. Seguridad

El usuario no debe encontrarse en riesgo durante la operación y el riesgo debe ser mínimo durante la limpieza.

8. Traslado continuo

Que el movimiento de los residuos dentro del separador sea continuo.

9. Eficiencia en el traslado

Se refiere a que los residuos efectivamente pasen de un lado a otro del separador.

*Desbloqueo*

1. Sencillez

2. Costo

3. Facilidad de operación

4. Facilidad de limpieza

5. Seguridad

6. Interferencia con el movimiento de los residuos

7. Interferencia con la separación

8. Eficiencia de desbloqueo

Se refiere a la cantidad de orificios que se desbloquean o que se mantienen así.

*Apertura de bolsas*

1. Sencillez

2. Costo

3. Facilidad de operación

4. Facilidad de limpieza

5. Seguridad
6. Interferencia con el movimiento de los residuos
7. Interferencia con la separación
8. Eficiencia de apertura

Se refiere a la cantidad de bolsas que pueden ser abiertas por el subsistema

#### 4.2.5.2 Selección de método de solución a cada subsistema

En esta etapa se realizará la selección de los métodos más convenientes para satisfacer las necesidades de cada subsistema. Esta selección se llevará a cabo mediante el método de matrices de decisión.

En este método se debe encontrar un factor de peso para cada parámetro, y con estos factores y mediante una escala se encuentra el método más adecuado.

Las matrices de factores de peso se presentan en el Anexo B.

Para la decisión de las alternativas más adecuadas se evalúan los métodos dependiendo del cumplimiento del parámetro deseado, según la escala siguiente.

1. Muy malo
2. Malo
3. Regular
4. Bueno
5. Muy bueno

Las matrices de decisión se encuentran en el Anexo B.

El sistema de separación no llevará una selección del método ya que lo que se quiere diseñar es una criba rotatoria o *trommel*, por lo que el método de separación será por criba. La criba propuesta es de 10 cm ya que de acuerdo con lo observado en las plantas de selección y en los estudios de generación llevados a cabo durante mis estudios en la maestría en Ingeniería Ambiental, la selección de residuos menores a este tamaño requieren de mayor tiempo que el que se tiene con el paso de los residuos por la banda. Así mismo el *trommel* instalado en la planta de selección de Santa Catarina cuenta con perforaciones aproximadamente de este tamaño.

De acuerdo con las calificaciones obtenidas en las matrices se tiene las siguientes soluciones para cada sistema:

*Separado de residuos*: Criba

*Traslado de residuos dentro del separador*: Gravedad (Inclinación)

*Evitar bloqueo de orificios*: Cepillo móvil

*Abrir bolsas*: Ganchos móviles

#### **4.2.6 Desarrollo de diseño conceptual**

El diseño conceptual se llevó a cabo utilizando el programa Autodesk Inventor, para el cual se tomaron como base las dimensiones generales del equipo comercial seleccionado en el capítulo anterior.

Los planos conceptuales de las diferentes partes que conformarán el *trommel* se encuentran en el Anexo C.

Para la plataforma de soporte se eligió una barra “I”, los cálculos de resistencia del perfil se encuentran en el Anexo E.

En las Figuras 4.6 a 4.11 se muestran las diferentes vistas del *trommel* diseñado.

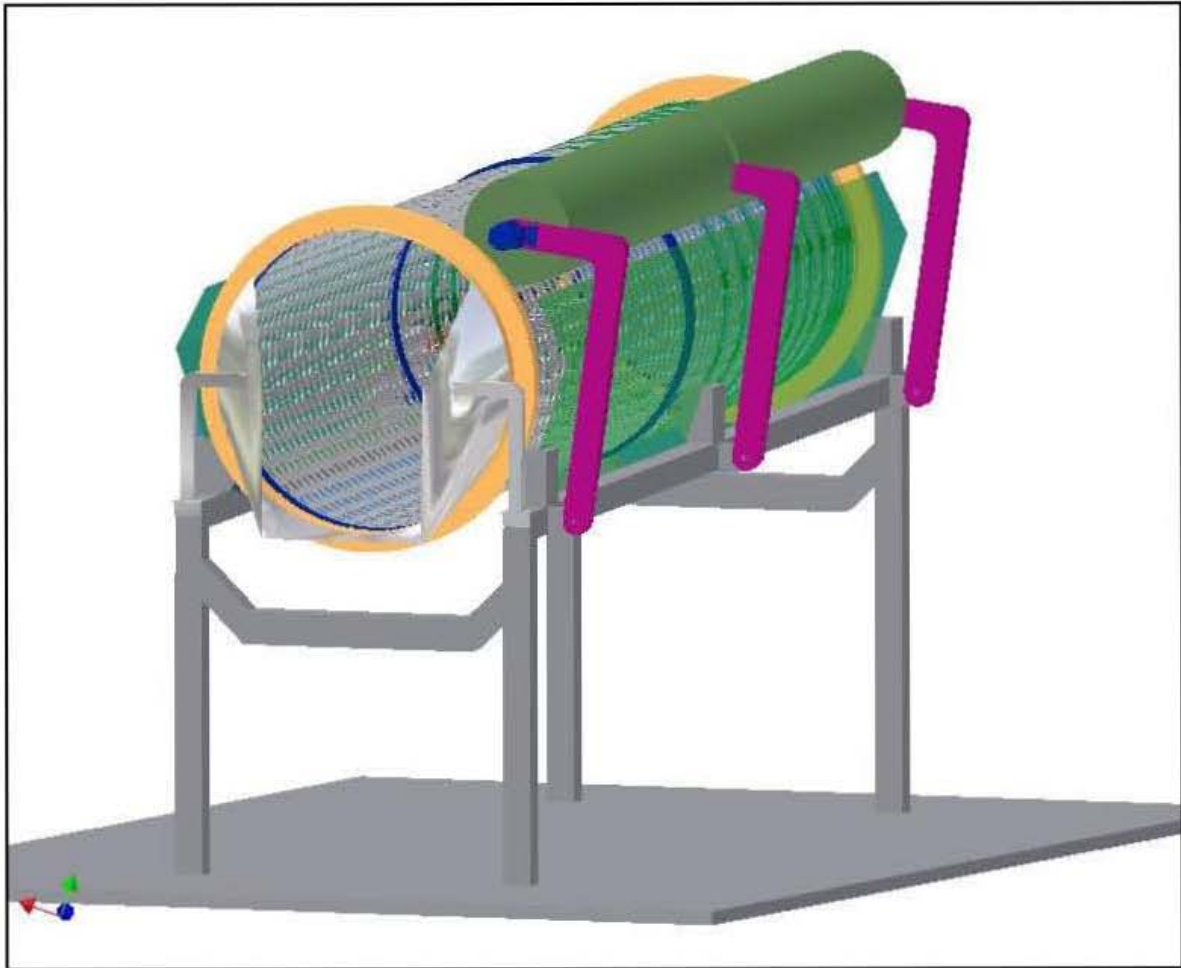


Figura 4.6. Vista isométrica del ensamble general

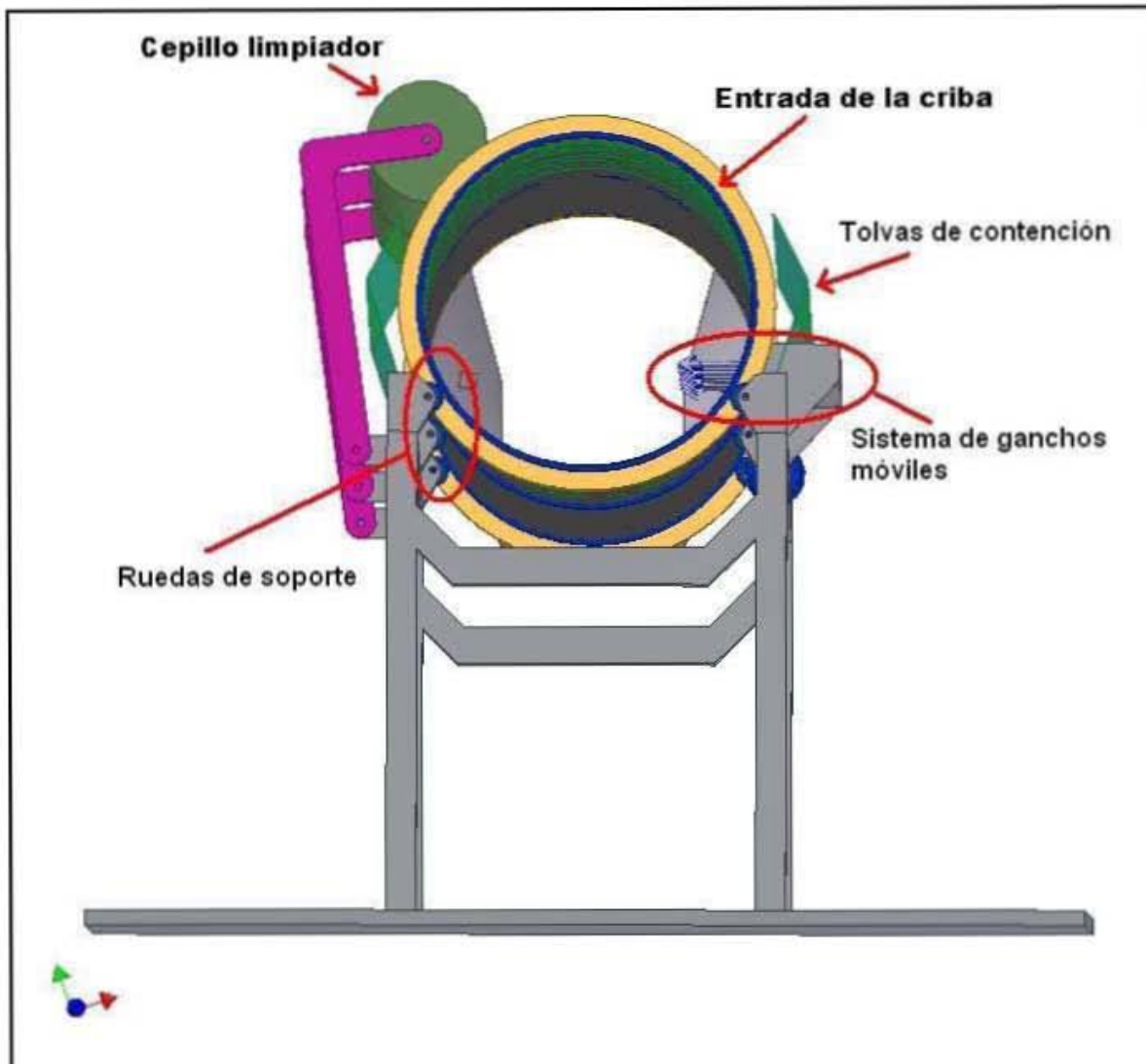


Figura 4.7. Vista posterior del ensamblaje general

Como se puede ver en la figura 4.7 se incluyeron tolvas laterales para que los residuos que pasen por la criba en la parte inferior lateral lleguen a la banda inferior donde serán recolectados.

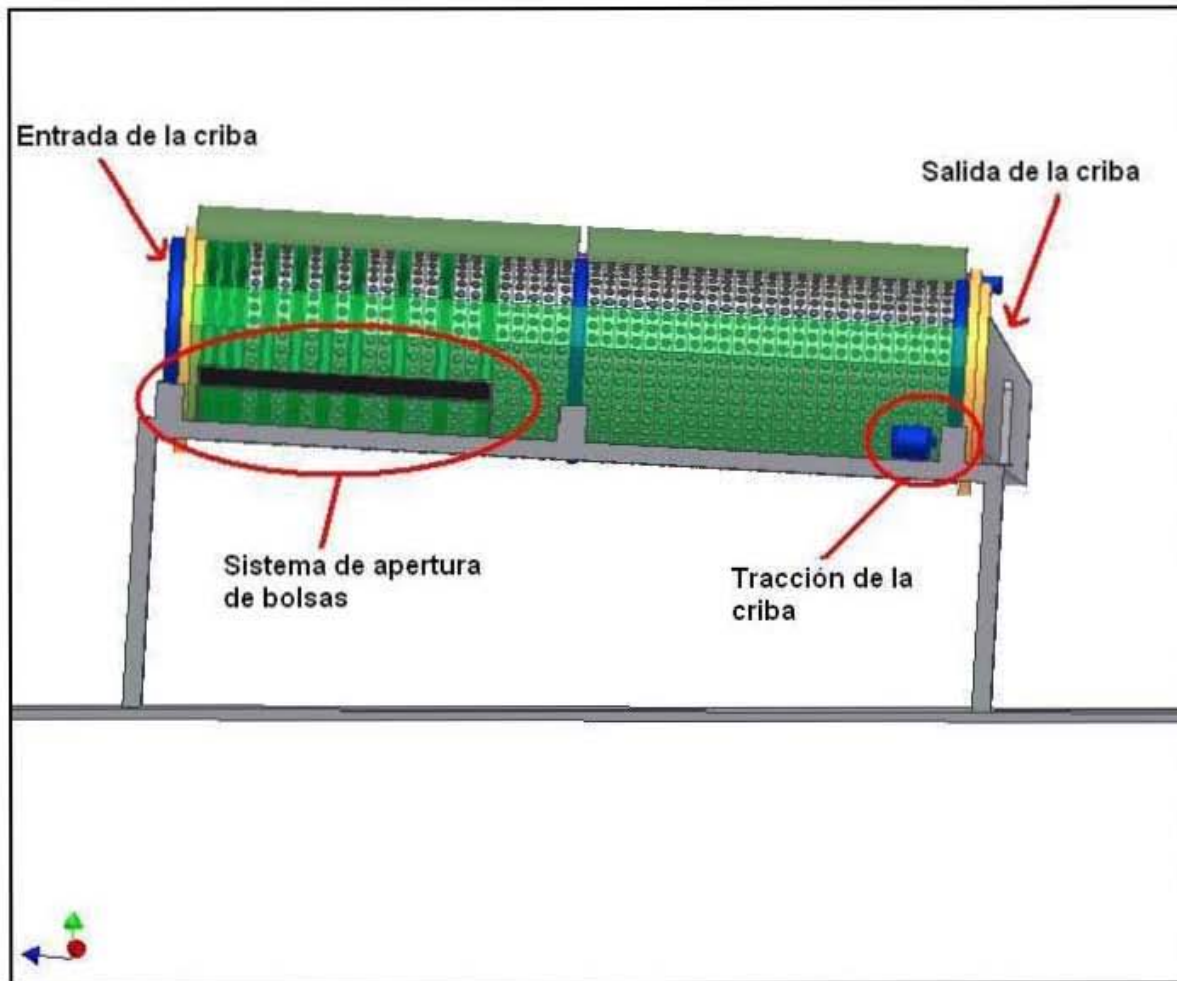


Figura 4.8. Vista lateral derecha del ensamblaje general

La tracción de la criba se lleva a cabo por medio de un sistema de motor eléctrico y una rueda de tracción.

El traslado de los residuos dentro del separador se da por gravedad, de acuerdo al método seleccionado, por lo que la salida se encuentra a un nivel inferior a la entrada como se puede ver en la figura 4.8. La inclinación propuesta es de  $4^\circ$  que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura (Tchobanoglous, 1993).

El sistema de apertura de bolsas se encuentra ubicado en la primera parte del separador ya que es el momento en el que se deben abrir las bolsas.



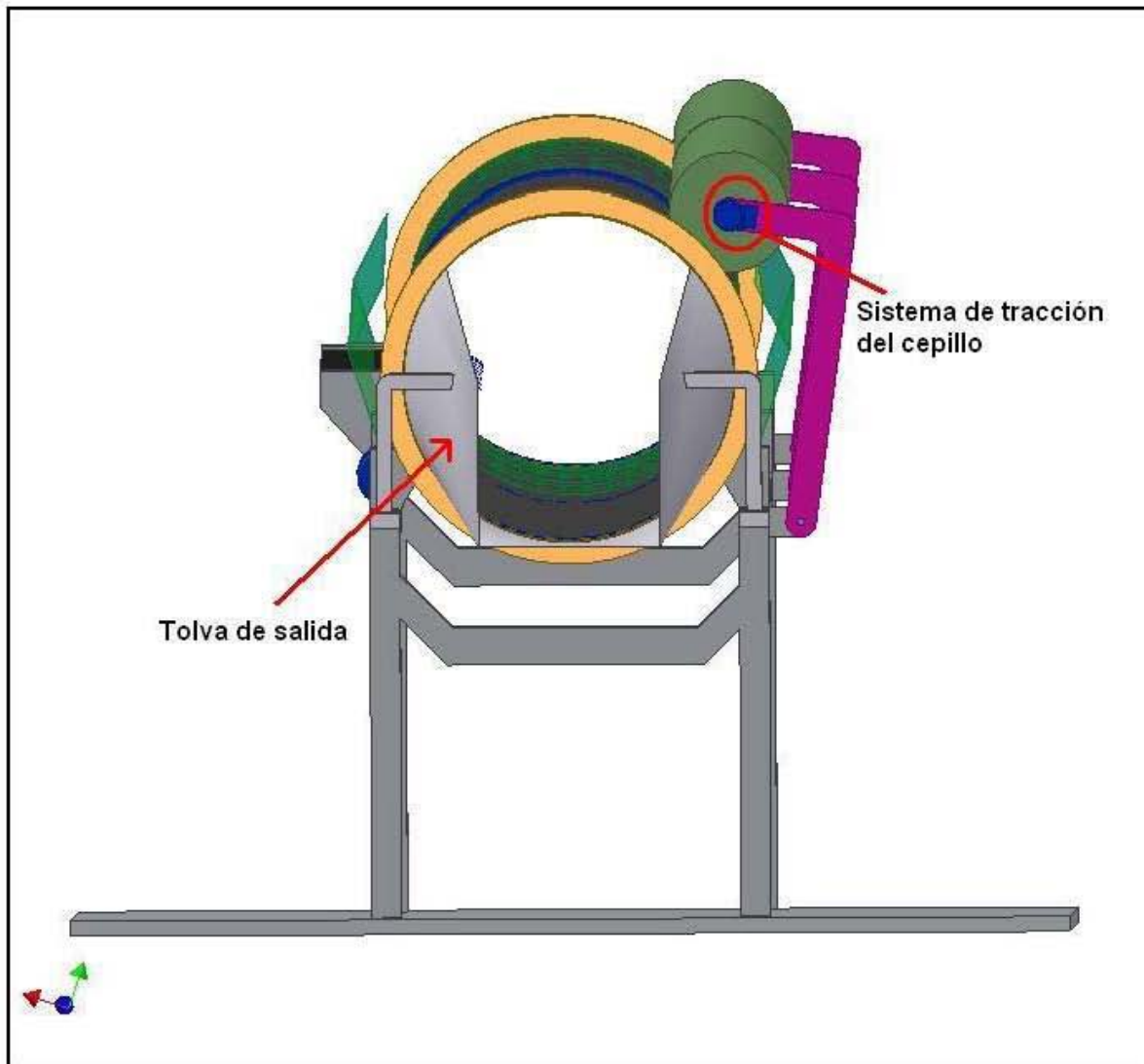


Figura 4.9. Vista frontal del ensamblaje general

El sistema de tracción del cepillo limpiador se encuentra montado sobre él mismo para evitar un sistema de transmisión.

Se colocó una tolva a la salida para asegurar que todos los residuos, que por su tamaño permanezcan en la criba, caigan en la banda de selección.

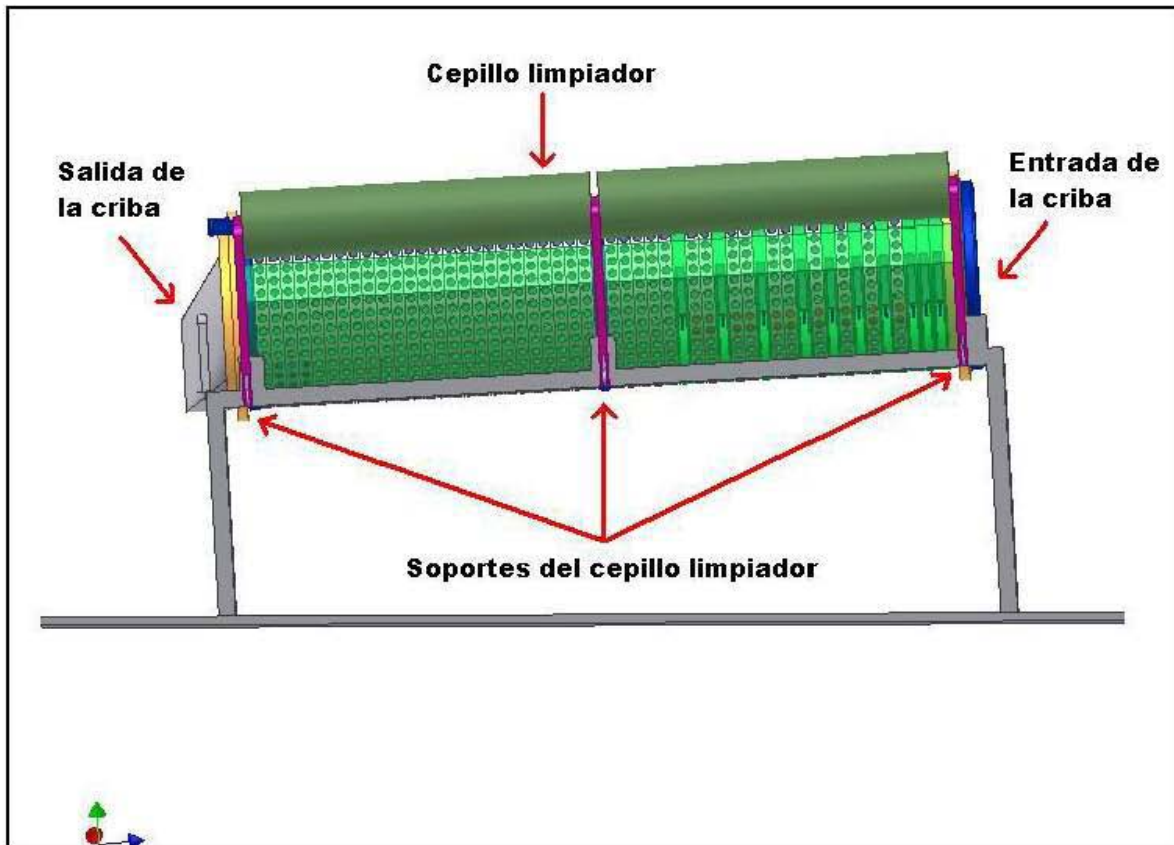


Figura 4.10. Vista lateral izquierda del ensamble general

Se le colocaron tres soportes al cepillo limpiador debido a la longitud que tiene el mismo.

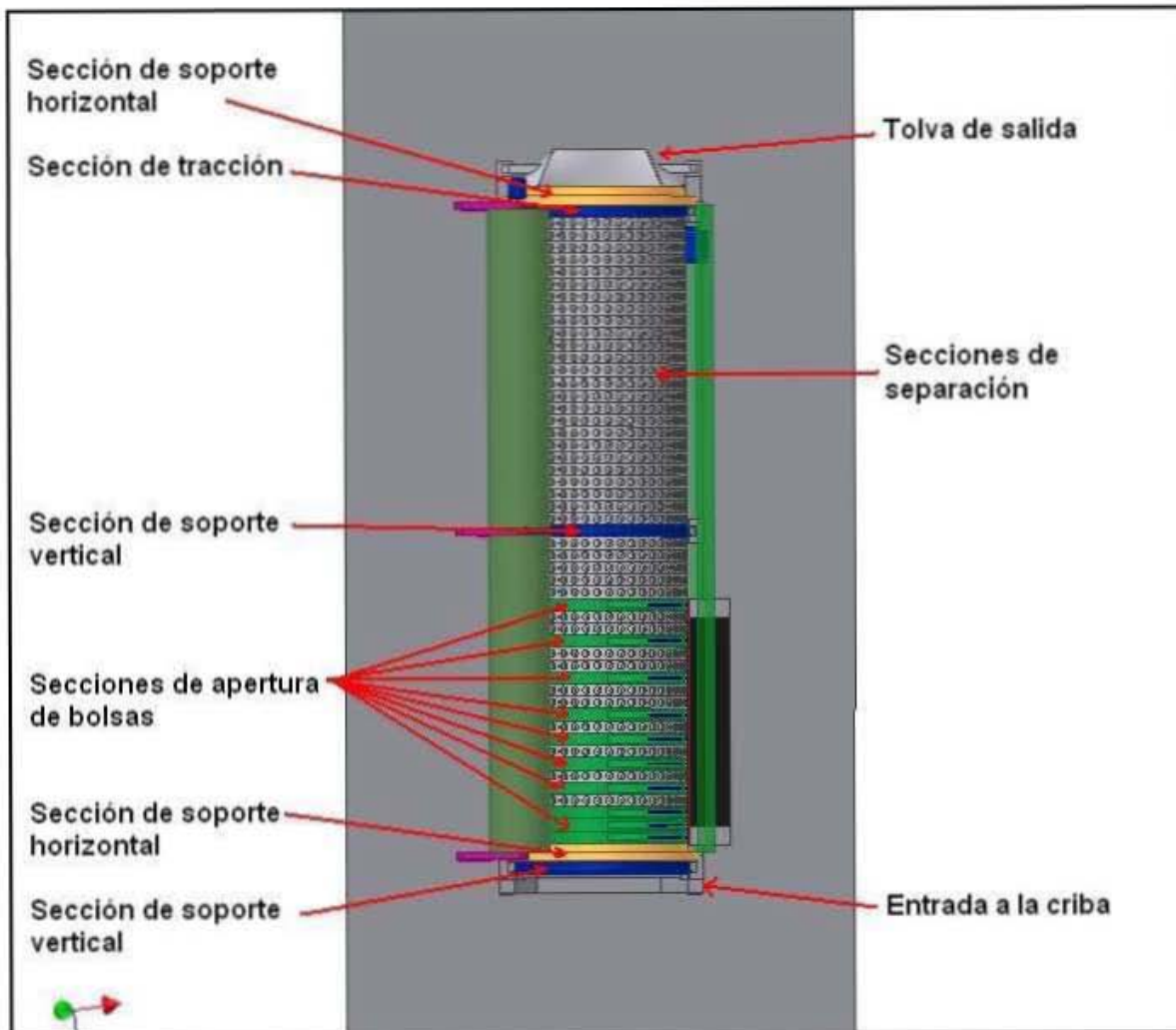


Figura 4.10. Vista superior del ensamblaje general

Como se muestra en la figura 4.10, se tienen diferentes secciones en la criba, la mayor parte está conformada por secciones de separación donde los agujeros son circulares para asegurar una separación uniforme por tamaño.

Otro tipo de sección son las de tracción y soporte vertical, que son idénticas, la única diferencia es que en una de ellas se aplica la tracción y en las demás se mantiene el *trommel* en movimiento dándole soporte. Estas secciones no tienen perforaciones.

Las secciones de soporte horizontal se colocaron para evitar que la criba se desplazara debido a la inclinación a la que se encuentra instalada, estas secciones se apoyarán en ruedas que no eviten el giro pero sí el desplazamiento.

Por último, las secciones de apertura de bolsas tiene perforaciones alargadas para que los ganchos al entrar y salir no golpeen la criba. Para evitar que los residuos se salgan por estas perforaciones, que tienen un área mayor a las de separación, se colocarán cepillos de alambre que se flexionen cuando el gancho entre y al salir y volver a su posición inicial eviten que los residuos se salgan y al mismo tiempo sean un apoyo para desgarrar las bolsas.

#### 4.2.7 Estimación del costo de construcción del equipo

Para esta parte se contó con el apoyo del Ing. Miguel Ángel Olvera, gerente general de Ingamex, de acuerdo con su experiencia en la construcción de equipos para tratamiento de agua y para la industria de la caña de azúcar (donde se ocupan *trommels* para separar sólidos de líquidos) estimó un precio de entre \$40 y \$50 pesos por kg, lo que incluye el material y la construcción. También propuso algunos cambios en los materiales sugeridos para la construcción de las partes del equipo. Los materiales finales se presentan en el Anexo D.

Para la estimación del precio se tomará el precio mayor por kg (\$50), además se considerará un 15% de utilidad (Dato sugerido también por el Ing. Olvera).

El cálculo de la masa se tomó pieza por pieza del programa Inventor 7, donde se puede seleccionar el material deseado y con una base de datos incluida en el programa, se obtienen los datos deseados.

La masa total es de 8,330 kg.

Con lo anterior se tiene que el costo final del equipo (incluyendo un 15% de utilidades) será de \$478,975.00 pesos.

Dentro de la estimación de costos no se tomó en cuenta la plataforma, ya que dependiendo del lugar donde se instalará, tendrá diferentes dimensiones de altura, lo que conllevará un menor o mayor costo.

En comparación con el precio que se tiene de \$1`500,000.00 de pesos para un *trommel* de 1.79 m de diámetro y 4.84 m de largo (instalado en la planta de composta de Mérida), el *trommel* diseñando tiene un costo del 32% y sus dimensiones son casi del doble, lo que

demuestra que se puede ajustar a las condiciones económicas del país además de las técnicas.

El *trommel* propuesto, dentro de las características técnicas que lo hacen más adecuado para trabajar en las condiciones del DF, cuenta con un sistema de apertura de bolsas, el cual no se encontró en ninguno de los *trommels* comerciales analizados, esto se convierte en una gran ventaja para que la separación sea más eficiente.

#### 4.2.8 Especificaciones de operación

Para que la operación del *trommel* sea sencilla se contará con un solo control por parte del usuario que será de encendido y apagado, la velocidad de giro será fija y se deberá calcular para la cantidad de residuos que en promedio entrarán en el equipo.

Para encontrar la velocidad óptima se deberán hacer pruebas para observar el movimiento de los residuos en el separador y asegurarse que se tiene un movimiento tipo catarata sin llegar a la velocidad crítica, la cual haría que los residuos se adhirieran a la pared del *trommel*.

Con el control de encendido se mandará la señal a los motores con que contará el separador (para el sistema de separación y el de desbloqueo).

Además se deberá instalar un sistema de control en el sistema de ganchos móviles para asegurar que al momento de apagar el equipo los ganchos se retraigan y si se requiere que el usuario entre en el tambor no se encuentre expuesto a los mismos.

#### 4.2.9 Pasos para el cálculo del incremento en la eficiencia

Como se ha explicado anteriormente, la instalación del *trommel* en las plantas de selección eliminaría la fracción “pequeña” de los residuos para que no ocupen lugar en las bandas de selección y que todos los residuos que lleguen a la banda sean de un tamaño suficiente para que sean recuperados por los pepenadores.

Para conocer el incremento que tendría la eficiencia de separación en las plantas se requiere la construcción de un prototipo del *trommel* para conocer la cantidad de residuos que se eliminarían de las bandas.

Una vez obtenido este dato se deberá tomar una muestra y hacerla pasar por el prototipo del *trommel* para eliminar los residuos “pequeños” de la misma. Una vez eliminados los residuos “pequeños” se deberán colocar los residuos restantes en una banda para que los pepenadores realicen la separación y de ahí inferir el aumento que se tendría en la eficiencia de separación de los distintos materiales en las plantas.

Todo lo anterior requeriría de un proyecto ejecutivo, además del diseño de detalle y la construcción de un prototipo por lo que se deberá realizar en etapas futuras del proyecto. Con los alcances que se tienen en esta tesis no es posible estimar el incremento que se tendría en la eficiencia de separación de las plantas.

Como se puede ver en el presente capítulo, la factibilidad técnica y económica de diseñar y construir un *trommel* para la Ciudad de México es muy alta, se puede ver que las características técnicas harán que el *trommel* funcione de una manera más adecuada y con mayor eficiencia que el *trommel* comercial seleccionado.

Además con el análisis de costos se puede observar que el ahorro en la construcción del separador diseñado es de alrededor del 65%, lo que, para las condiciones económicas actuales del país representa un gran ahorro en comparación de la compra de un equipo diseñado y construido en países desarrollados.

## 5. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo.

Después de analizar las diferentes aplicaciones en las cuales sería posible utilizar el equipo de separación tipo *trommel* en el DF se eligió la aplicación en las plantas de selección como la más adecuada; esto se debe a que las plantas de selección se encuentran operando y tienen mayor posibilidad de equiparse debido a que son las uniones las que adquieren los equipos complementarios.

Una vez seleccionada la aplicación en las plantas de selección se analizaron las condiciones legales, políticas, sociales, laborales, económicas y técnicas a las cuales estaría expuesto el *trommel*, encontrándose diferentes particularidades en cada una de las condiciones, que hacen que se requieran equipos con características muy específicas para que funcionen adecuadamente en las plantas de selección del DF.

Se solicitó información a los proveedores de equipos y se recabaron datos técnicos de diferentes equipos comerciales, haciendo una comparación entre las condiciones encontradas en las plantas de selección y los datos obtenidos se prosiguió con la selección del equipo comercial más adecuado.

El separador seleccionado fue el Komptech 2590 de origen alemán. Este equipo no tiene un sistema para abrir las bolsas donde vienen los residuos que es una de las condiciones encontradas en la Ciudad de México y que harían que este equipo no funcionara de manera eficiente.

Una vez seleccionado el equipo, se hizo un análisis del funcionamiento de las plantas de selección y de la tecnificación que se podría tener en las mismas. Esta tecnificación podría ser total pero debido a las condiciones económicas y sociales que se viven en las plantas, se sugiere una tecnificación inicial que no remplace la separación manual sino que ayude a hacerla más eficiente.

Se realizó el diseño conceptual de un *trommel* para mejorar su aplicación en las condiciones del DF, para lo que se reconocieron las necesidades y especificaciones que deberá cumplir el *trommel*, se definió la función principal así como los sistemas. Los cuatro sistemas encontrados fueron el traslado, la separación, el desbloqueo y la apertura de bolsas. A continuación se propusieron formas de solución para cada sistema y utilizando el método de matrices de selección se obtuvieron los métodos más adecuados para cada uno de los sistemas. Se realizó la configuración de los sistemas para que, en conjunto, se cumplieran las diferentes funciones y finalmente se realizaron los planos conceptuales del equipo.

El equipo diseñado está en la etapa conceptual, aunque se hizo una sugerencia de los diferentes materiales a emplear, se debe realizar una selección de materiales adecuada en la etapa del diseño de detalle, donde se calcularán las diferentes piezas que se deben fabricar y se enlistarán las piezas comerciales. Una vez concluida la etapa de diseño de detalle se podría tener una cotización exacta de los costos que representa cada una de las piezas, lo mostrado en este trabajo es una cotización aproximada y adquirida con los datos que hasta el momento se tienen.



**ANEXO A**

## Proveedores de equipos consultados

- 1. Wildcat Manufacturing Co., Inc.** Box 1100, 420 South Hwy 81 Freeman, SD 57029, Tel. (800) 627-3954, Fax. (605) 925-7536 <http://www.wildcatmfg.com/>
- 2. American Pulverizer Company**, 5540 West Park Ave. St. Louis, MO 63110, Tel. (314) 781-6100, Fax. (314) 781-9209, <http://www.ampulverizer.com>
- 3. Brentwood Recycling Systems**, 238 Berkeley Rd, Unanderra, New South Wales Australia 2519, Tel. 61 2 42 717511, Fax. 61 2 42 729339, <http://www.brentwood.com.au>
- 4. Tecnologías avanzadas de residuos S.A. C/ Platón**, 6 08021 Barcelona, Tel. +34 93 200 36 91 / 66 73, Fax. +34 93 209 37 98, <http://www.tarsa.net/spancontac.htm>
- 5. Portable Screens**, P.O. Box 247, La grange, TX 78945, Tel. 888-838-9252, <http://www.portablescreen.com/index.html>
- 6. Smico Manufacturing Company, Llc**, 500 N. MacArthur Oklahoma City, OK 73127 Tel. 405-946-1461, Fax. 405-946-1472, <http://www.smico.com/trommel.htm>
- 7. The Screen Machine**, 7001 Americana Parkway Reynoldsburg, Ohio 43068 USA Tel. 614.866.0112, Fax. 614.866.1181, <http://www.thescreenmachine.com/html/homepage.html>
- 8. Sutco RecyclingTechnik**, Britanniahütte 14 D-51469 Bergisch Gladbach, Tel.: +49 2202 / 2005-01, Fax. +49 2202 / 2005-70 E-Mail: [info@sutco.de](mailto:info@sutco.de)
- 9. Extec Screens & Crushers Limited**, Hearthcote Road, Derbyshire, England DE11 9DU, Tel: +44 (0) 1283 212121, Fax: +44 (0) 1283 217342, [www.extecscreens.com](http://www.extecscreens.com)

**10. Diamond Z Manufacturing**, 11299 Bass Lane, Caldwell, Idaho 83605, Tel. 1.800.949.2383 / 208.585.2929, Fax: 208.585.2112 [diamondz@diamondz.com](mailto:diamondz@diamondz.com)

**11. Komptech GmbH**, A-8130 Frohnleiten, Kühau 37, Germany, Tel.+43 3126 505 – 0, Fax. +43 3126 505 – 505, <http://www.komptech.com>

**12. Metso Lindemann GmbH**, Erkrather Straße 401 D-40231 Düsseldorf, Germany, Tel. +49 211 21 05 0, Fax. +49 211 21 05 376, [www.metsominerals.com/metalwasterecycling](http://www.metsominerals.com/metalwasterecycling)

**Anexo B**  
Matrices de factor de peso y de decisión.

Matriz de factor de peso para el sistema de traslado.

| Parámetro                                       | Posibles decisiones |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |       |    |    |    |    |    |    |    | De<br>c.<br>Po<br>s. | Fac.d<br>e<br>Peso<br>(α) |       |
|---|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-------|----|----|----|----|----|----|----|----------------------|---------------------------|-------|
|   | 1                   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28  | 29    | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |                      |                           |       |
| Sencillez                                       | 0                   | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |       |    |    |    |    |    |    |    | 2                    | 0.056                     |       |
| Costo   | 1                   |   |   |   |   |   |   | 1 | 1 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |       |    |    |    |    |    |    |    | 6                    | 0.167                     |       |
| Interferencia con el movimiento de los residuos |                     | 0 |   |   |   |   |   | 0 |   |    |    |    |    |    |    | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |    |    |    |    |    |    |     |       |    |    |    |    |    |    |    | 1                    | 0.028                     |       |
| Interferencia con la separación                 |                     |   | 1 |   |   |   |   |   |   | 0  |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  |     |       |    |    |    |    |    |    |    | 5                    | 0.139                     |       |
| Facilidad de operación                          |                     |   |   | 1 |   |   |   |   |   |    | 0  |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 0  |    |    |    |    | 1   | 0     | 1  | 0  |    |    |    |    |    | 4                    | 0.111                     |       |
| Facilidad de limpieza                           |                     |   |   |   | 0 |   |   |   |   |    |    | 0  |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 0  |    |    |    |     | 0     |    |    | 0  | 1  | 0  |    |    | 2                    | 0.056                     |       |
| Seguridad                                       |                     |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    |    |     | 1     |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  | 8                    | 0.222                     |       |
| Traslado continuo                               |                     |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |    |    |    | 0  |    |    |    |    |    | 0  |    |    |    |    | 0  |    |    |     |       | 0  |    |    | 0  | 0  |    | 0  | 1                    | 0.028                     |       |
| Eficiencia en el traslado                       |                     |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 1  |     |       |    |    | 1  |    |    | 1  | 0  | 1                    | 7                         | 0.194 |
|   |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Tot | 1.000 |    |    |    |    |    |    |    |                      |                           |       |

Matriz de factor de peso para el sistema de desbloqueo.

| Parámetro                                       | Posibles decisiones |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Dec. Pos. | Fac.de Peso ( $\alpha$ ) |       |
|---|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|--------------------------|-------|
|   | 1                   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |           |                          |       |
| Sencillez                                       | 0                   | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1         | 0.036                    |       |
| Costo   | 1                   |   |   |   |   |   |   | 1 | 1 | 0  | 1  | 1  | 0  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 5         | 0.179                    |       |
| Facilidad de operación                          |                     | 1 |   |   |   |   |   | 0 |   |    |    |    |    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1         | 0.036                    |       |
| Facilidad de limpieza                           |                     |   | 0 |   |   |   |   |   | 0 |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 0  | 1  | 0  | 0  |    |    |    |    |    |    | 2         | 0.071                    |       |
| Seguridad                                       |                     |   |   | 1 |   |   |   |   |   | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  | 0  | 1  |    |    |    | 6         | 0.214                    |       |
| Interferencia con el movimiento de los residuos |                     |   |   |   | 1 |   |   |   |   |    |    | 0  |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 0  |    | 0  |    |    | 0  | 0  |    | 2         | 0.071                    |       |
| Interferencia con la separación                 |                     |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    | 0  |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |    | 1  |    | 1  | 0         | 5                        | 0.179 |
| Eficiencia de desbloqueo                        |                     |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 0  |    | 1  | 1         | 6                        | 0.214 |
|   |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Total     | 1.000                    |       |

Matriz de factor de peso para el sistema de apertura de bolsas.

| Parámetro                                       | Posibles decisiones |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Dec. Pos. | Fac.de Peso ( $\alpha$ ) |       |
|---|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|--------------------------|-------|
|   | 1                   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |           |                          |       |
| Sencillez                                       | 0                   | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |           | 1                        | 0.036 |
| Costo   | 1                   |   |   |   |   |   |   | 1 | 0 | 0  | 1  | 1  | 0  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |           | 4                        | 0.143 |
| Facilidad de operación                          |                     | 1 |   |   |   |   |   | 0 |   |    |    |    |    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |           | 1                        | 0.036 |
| Facilidad de limpieza                           |                     |   | 1 |   |   |   |   |   | 1 |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 0  | 0  | 0  | 0  |    |    |    |    |    |    |           | 3                        | 0.107 |
| Seguridad                                       |                     |   |   | 1 |   |   |   |   |   | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    |    |    |           | 7                        | 0.250 |
| Interferencia con el movimiento de los residuos |                     |   |   |   | 0 |   |   |   |   |    | 0  |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    | 0  |    |    | 0  | 0  |           | 2                        | 0.071 |
| Interferencia con la separación                 |                     |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    | 0  |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 0  |    | 1  |    | 1  |           | 5                        | 0.179 |
| Eficiencia de apertura                          |                     |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 0  |    | 1  | 0  |           | 5                        | 0.179 |
|   |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |           | Total                    | 1.000 |

Matriz de decisión para el sistema de traslado.

|                             | Parámetros |       |                        |                     |                        |                       |           |                   |                           | Factor de desempeño( $\beta$ ) |
|-----------------------------|------------|-------|------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|
|                             | Sencillez  | Costo | Interferencia con mov. | Cambios en residuos | Facilidad de operación | Facilidad de limpieza | Seguridad | Traslado continuo | Eficiencia en el traslado |                                |
| Factor de Peso ( $\alpha$ ) | 0.056      | 0.167 | 0.028                  | 0.139               | 0.111                  | 0.056                 | 0.222     | 0.028             | 0.194                     |                                |
| Método                      |            |       |                        |                     |                        |                       |           |                   |                           |                                |
| Cuerda                      | 4          | 3     | 3                      | 5                   | 5                      | 3                     | 5         | 4                 | 5                         | 4.417                          |
| Gravedad                    | 5          | 5     | 5                      | 5                   | 5                      | 5                     | 5         | 3                 | 3                         | 4.556                          |
| Vibración                   | 2          | 2     | 3                      | 5                   | 3                      | 4                     | 2         | 4                 | 3                         | 2.917                          |
| Cadenas                     | 3          | 4     | 2                      | 5                   | 3                      | 2                     | 2         | 4                 | 3                         | 3.167                          |
| Cadenas con paletas         | 2          | 2     | 2                      | 5                   | 3                      | 1                     | 2         | 4                 | 4                         | 2.917                          |
| Pistón                      | 2          | 1     | 2                      | 5                   | 3                      | 3                     | 4         | 1                 | 4                         | 3.222                          |
| Por fluido                  | 2          | 2     | 3                      | 2                   | 3                      | 4                     | 4         | 4                 | 4                         | 3.139                          |
| Mecanismo                   | 2          | 3     | 2                      | 5                   | 3                      | 3                     | 2         | 1                 | 4                         | 3.111                          |

Matriz de decisión para el sistema de desbloqueo.

|                             | Parámetros |       |                        |                       |           |                                    |                                 |                          | Factor de desempeño( $\beta$ ) |
|-----------------------------|------------|-------|------------------------|-----------------------|-----------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
|                             | Sencillez  | Costo | Facilidad de operación | Facilidad de limpieza | Seguridad | Interferencia con el mov. de los R | Interferencia con la separación | Eficiencia de desbloqueo |                                |
| Factor de Peso ( $\alpha$ ) | 0.036      | 0.179 | 0.036                  | 0.071                 | 0.214     | 0.071                              | 0.179                           | 0.214                    |                                |
| Método                      |            |       |                        |                       |           |                                    |                                 |                          |                                |
| Cepillo móvil               | 3          | 3     | 4                      | 4                     | 4         | 4                                  | 4                               | 5                        | 4.000                          |
| Cepillo fijo                | 4          | 4     | 5                      | 2                     | 5         | 4                                  | 4                               | 3                        | 3.893                          |
| Contraparte de agujeros     | 3          | 2     | 4                      | 4                     | 4         | 4                                  | 4                               | 5                        | 3.821                          |
| Pistón                      | 3          | 2     | 3                      | 3                     | 4         | 4                                  | 4                               | 3                        | 3.286                          |
| Por fluido                  | 2          | 2     | 3                      | 4                     | 4         | 3                                  | 2                               | 5                        | 3.321                          |
| Mecanismo                   | 3          | 3     | 3                      | 3                     | 4         | 4                                  | 4                               | 3                        | 3.464                          |
| Actuadores individuales     | 1          | 1     | 2                      | 2                     | 4         | 4                                  | 4                               | 5                        | 3.357                          |
| Vibración                   | 2          | 3     | 3                      | 5                     | 3         | 3                                  | 3                               | 3                        | 3.107                          |

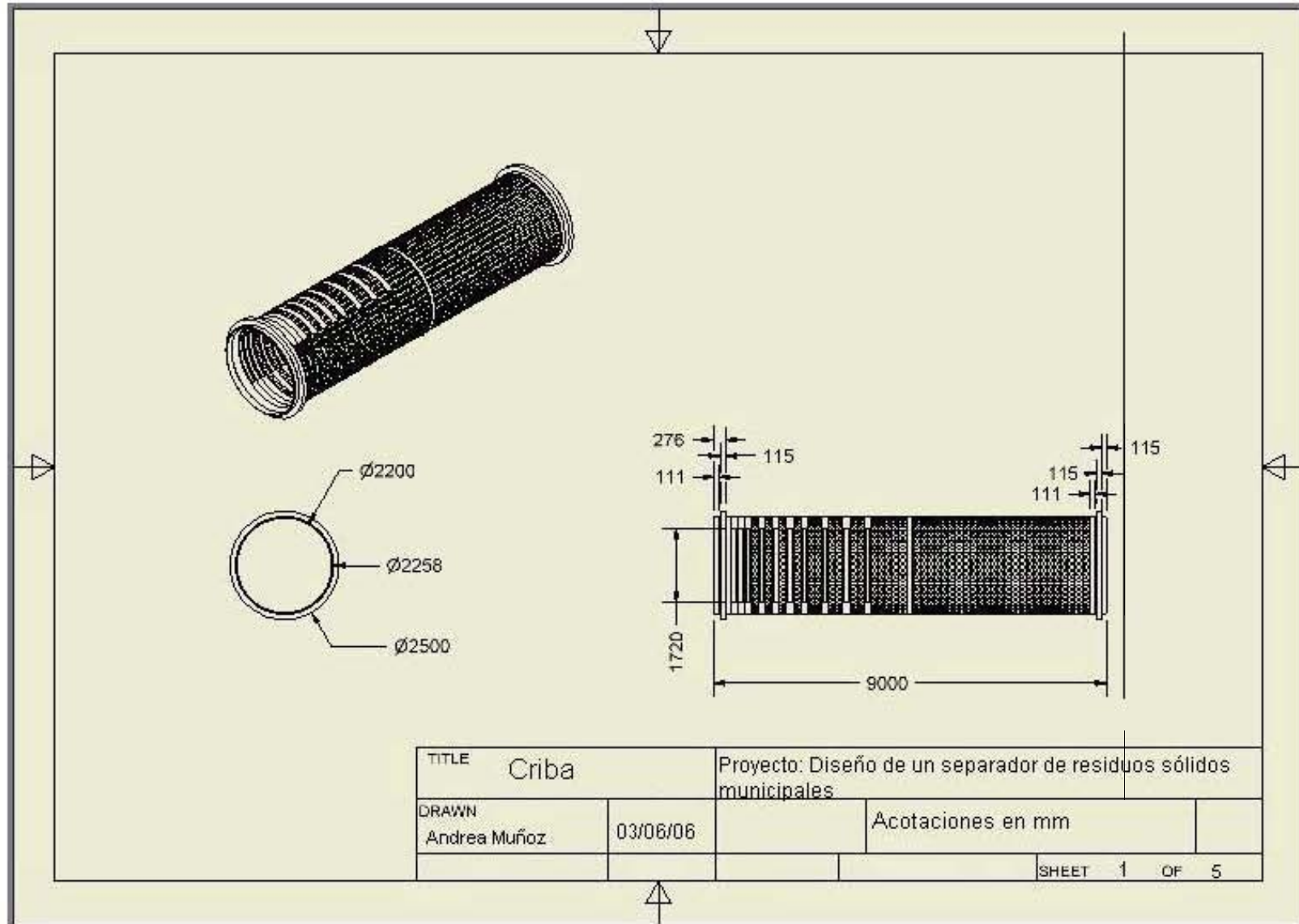
Matriz de decisión para el sistema de apertura de bolsas.

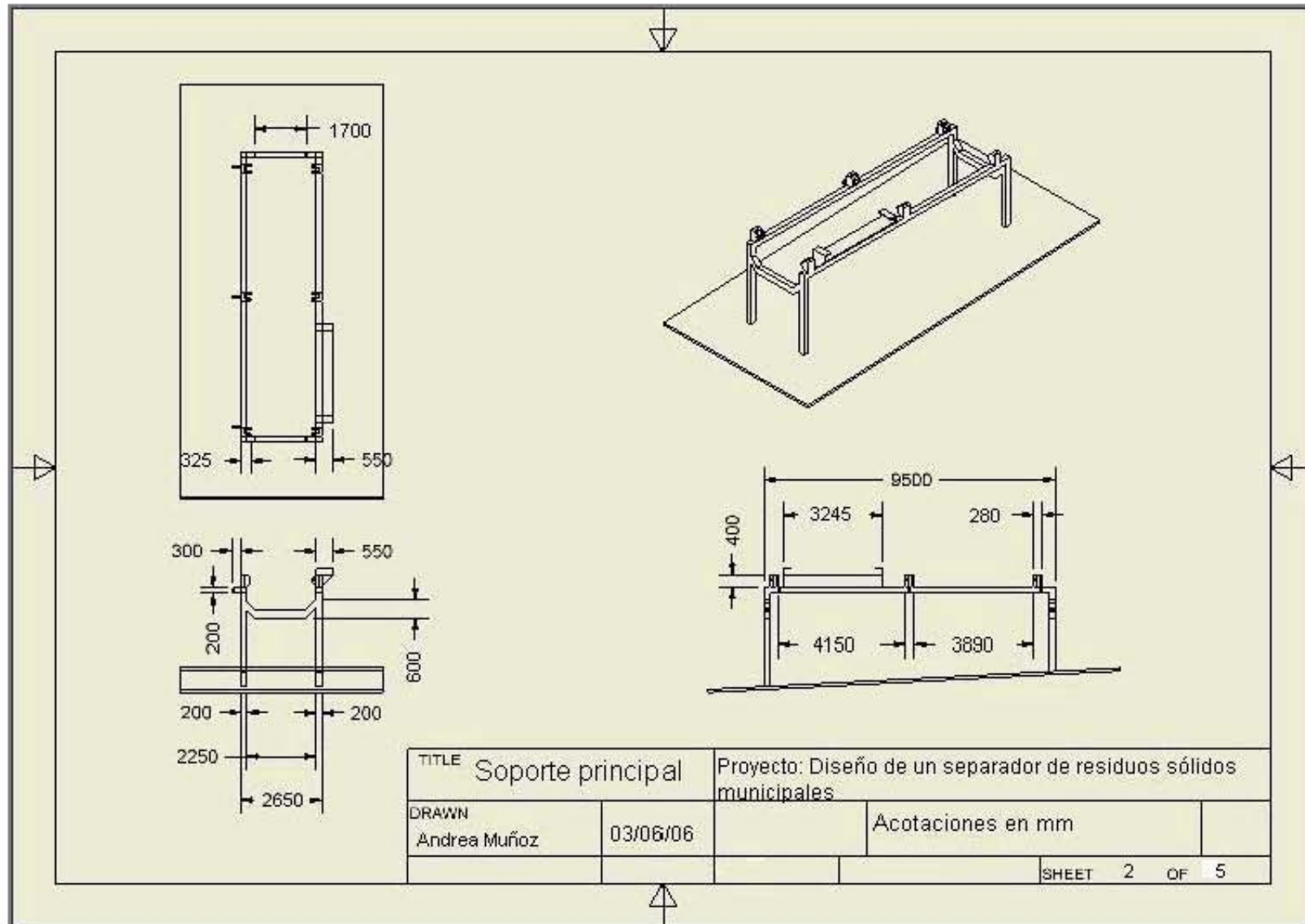
|                             | Parámetros |       |                        |                       |           |                                    |                                 |                        | Factor de desempeño( $\beta$ ) |
|-----------------------------|------------|-------|------------------------|-----------------------|-----------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|
|                             | Sencillez  | Costo | Facilidad de operación | Facilidad de limpieza | Seguridad | Interferencia con el mov. de los R | Interferencia con la separación | Eficiencia de apertura |                                |
| Factor de Peso ( $\alpha$ ) | 0.036      | 0.143 | 0.036                  | 0.107                 | 0.250     | 0.071                              | 0.179                           | 0.179                  |                                |
| Método                      |            |       |                        |                       |           |                                    |                                 |                        |                                |
| Cuchillas                   | 4          | 4     | 5                      | 3                     | 3         | 4                                  | 3                               | 2                      | 3.143                          |
| Ganchos                     | 3          | 4     | 5                      | 3                     | 3         | 4                                  | 2                               | 3                      | 3.107                          |
| Ganchos móviles             | 2          | 3     | 4                      | 2                     | 2         | 4                                  | 4                               | 5                      | 3.250                          |
| Cuchillas móviles           | 2          | 3     | 4                      | 2                     | 2         | 4                                  | 4                               | 4                      | 3.071                          |
| Chorro de agua              | 2          | 2     | 4                      | 4                     | 2         | 2                                  | 3                               | 5                      | 3.000                          |
| Laser                       | 2          | 2     | 4                      | 4                     | 2         | 4                                  | 4                               | 4                      | 3.143                          |
| Manual                      | 4          | 4     | 1                      | 4                     | 1         | 3                                  | 3                               | 3                      | 2.714                          |

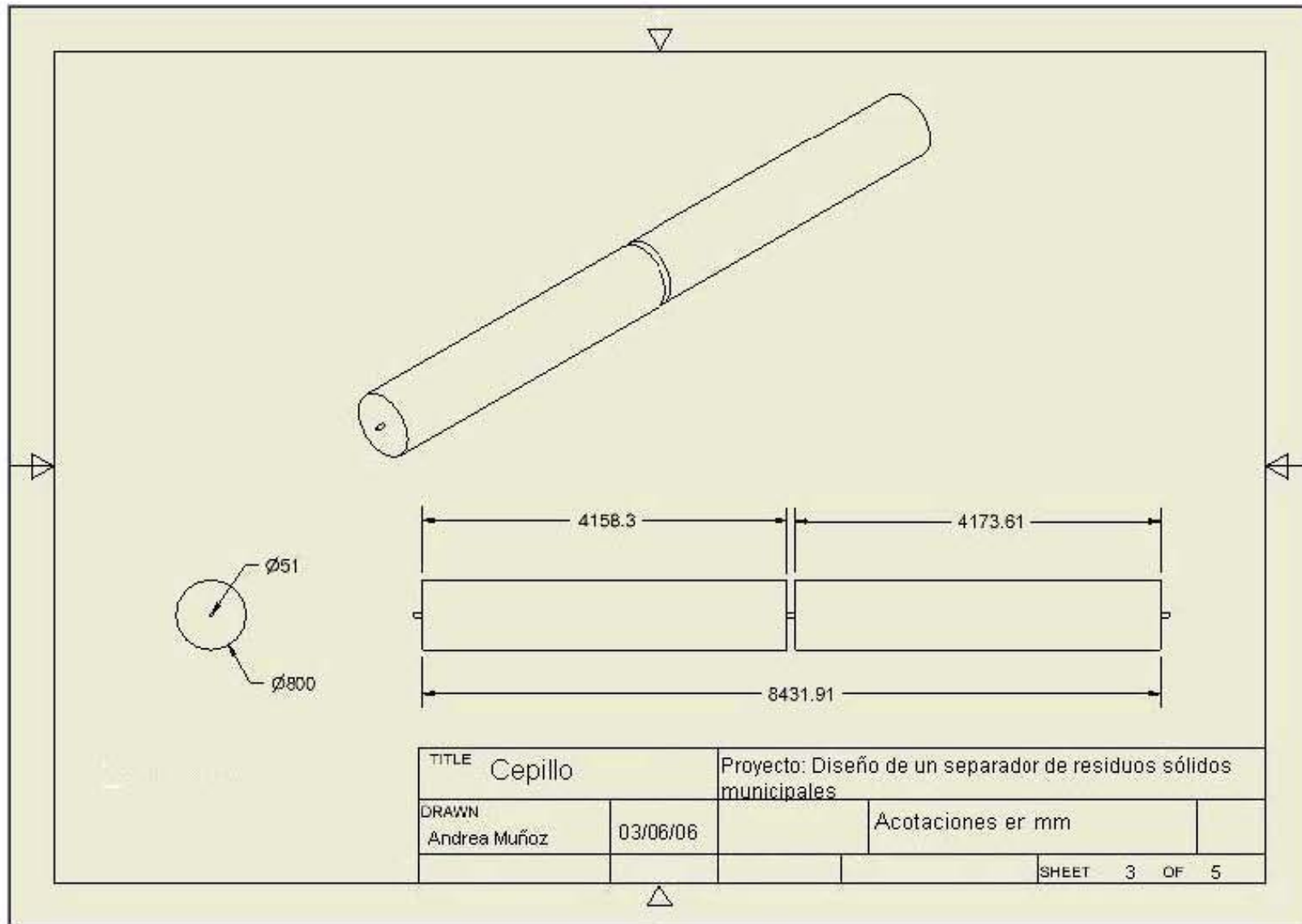


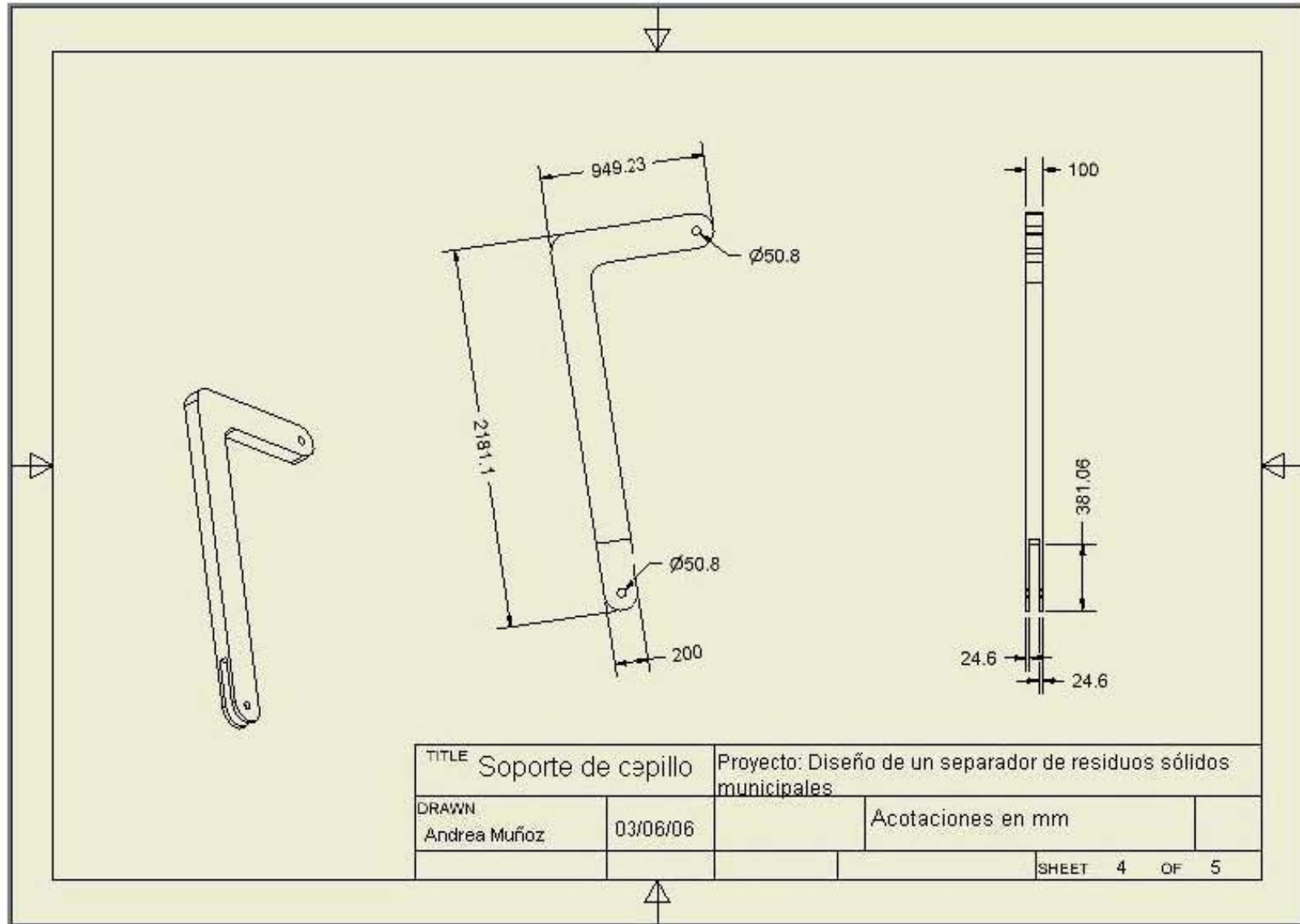
**Anexo C**

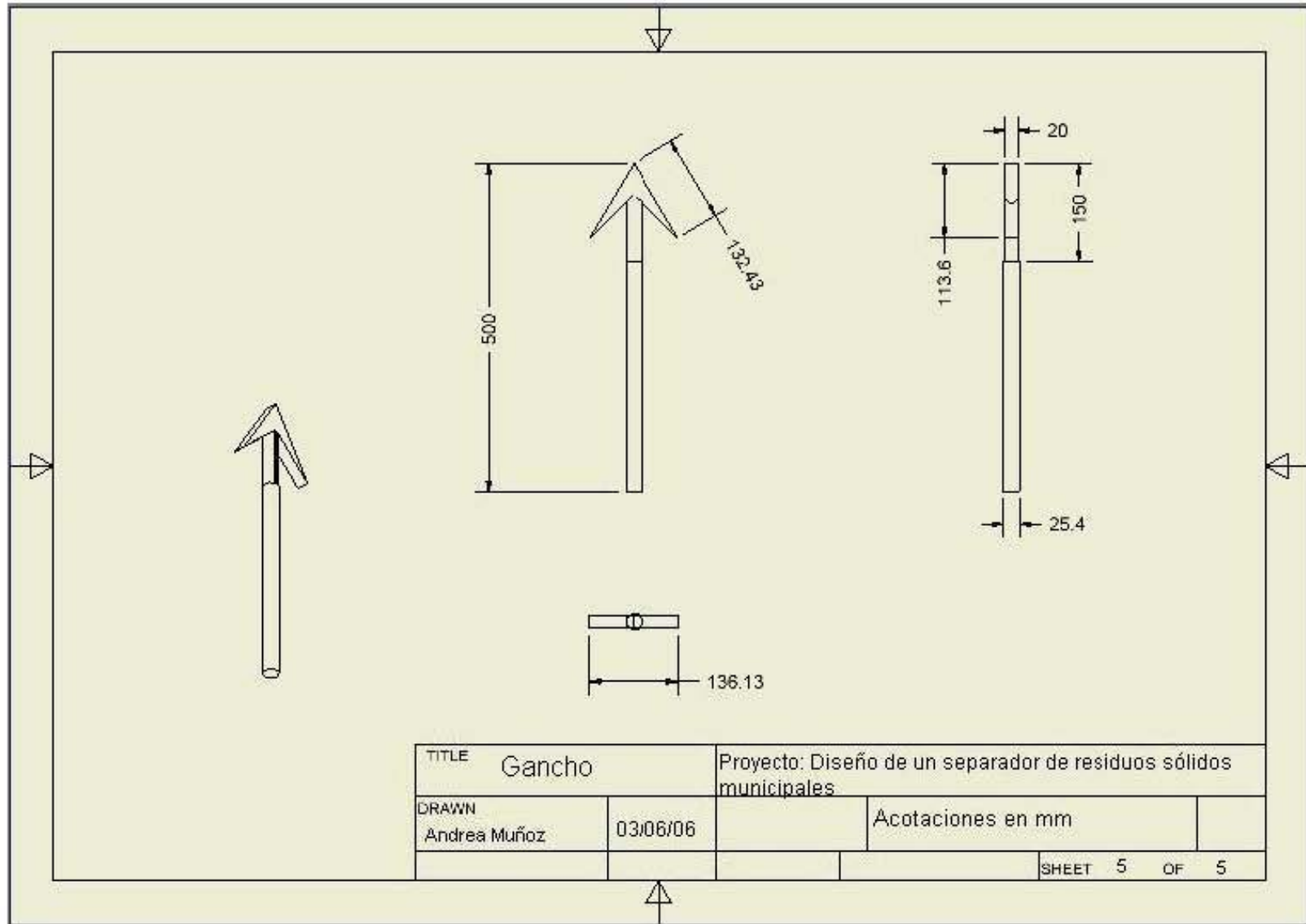
Planos conceptuales de los elementos que conforman el *trommel*.











## ANEXO D

### Características de fabricación propuestas

Se presentan los elementos, sus materiales y el tipo de fabricación propuestas.

1. Soporte principal

Material: IPR galvanizado o con algún recubrimiento epóxico

Manufacturado: Soldadura

2. Criba

Material: Placa de acero inoxidable 304 para el cuerpo. Las pistas de SAE 3/8 rolado

Manufacturado: Doblado y corte con punzonado

3. Ruedas de soporte de criba

Material: Acero con recubrimiento de SBR con hule natural vulcanizado

Cantidad: Seis

4. Sistema de tracción para la criba

Motor: Eléctrico 7.5 hp 1750 rpm

Reductor: no necesita

5. Cepillos metálicos para ranuras en la criba

Material: acero plata templado al agua. Solera de coldroll 1045 para los soportes

6. Tolvas de contención

Material: Lámina galvanizada calibre 22

Manufacturado: Cortado y doblado

7. Tolva de salida

Material: Lámina galvanizada

Manufacturado: Doblado

8. Cepillo

Material: Cerdas de polietileno

9. Soportes de cepillo

Material: Placa comercial A36 de 1" de ancho

Manufacturado: Corte con pantógrafo

10. Sistema de tracción de cepillo

Motor: (200 rpm) 1750 rpm cadena y catarina 4:1 de 2HP

Reductor: no

11. Ganchos

Material: Acero inoxidable 304

Manufacturado: Fundición

12. Sistema de tracción de ganchos

Motor: (120 rpm) dos ranuras 1750 rpm relación 9.5

Reductor: no

13. Sistema de levas de ganchos

Levas en tambor desmontables de placa

Placa de ganchos rígida con resortes de regreso



**ANEXO E**

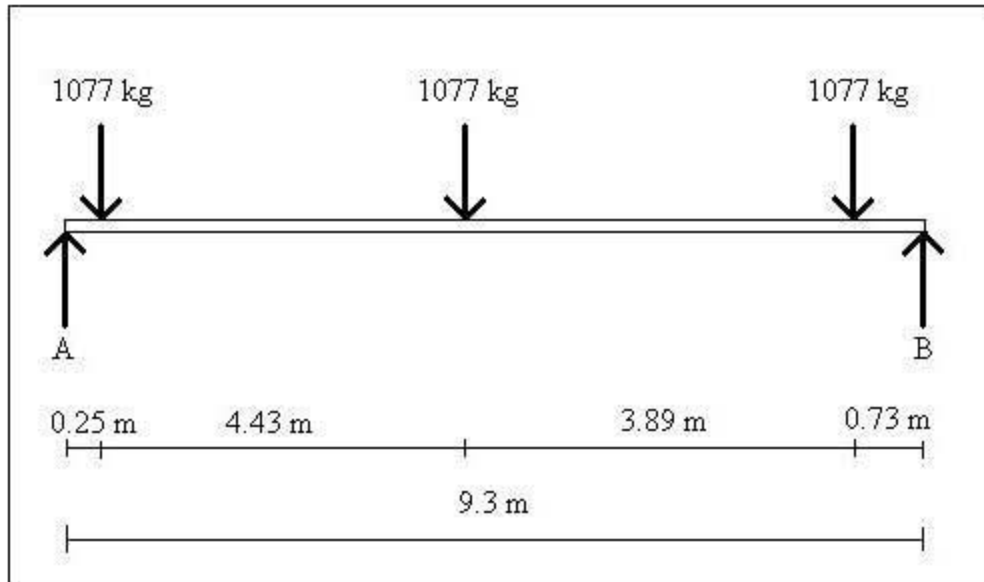
## Selección del perfil para el soporte principal

Para la selección del perfil que se utilizará en el soporte principal se realizó un diagrama de cuerpo libre del lado más largo del mismo.

Las fuerzas aplicadas serán la del tambor del *trommel* más los residuos que se encuentren adentro. El tambor tiene un volumen aproximado de  $0.447 \text{ m}^3$ , si se considera una densidad media del acero de  $8,700 \text{ kg/m}^3$ , el peso del tambor será de  $3,892 \text{ kg}$  repartido en los seis puntos de apoyo.

Los residuos que se encuentran en un momento dado en el separador son  $25.71 \text{ m}^3$ , se considerará, de acuerdo a la experiencia, un peso volumétrico de  $100 \text{ kg/m}^3$ , por lo que se tiene un peso de los residuos de  $2,572 \text{ kg}$ , los cuales también se encuentran repartidos en los seis soportes.

Se considerará que los pesos se encuentran uniformemente distribuidos en los seis soportes, con lo cual se tiene un peso de  $1,077 \text{ kg}$  en cada uno de los soportes. Este es el dato que se utilizará para el diagrama de cuerpo libre de la barra del soporte. El diagrama de cuerpo libre se muestra en la figura siguiente.



Donde A y B son las reacciones en los soportes de la barra.

Para conocer el valor de A y B se realizan las sumatorias de fuerzas y de momentos.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$-9.3B + 0.25(1077) + (0.25 + 4.43)(1077) + (0.25 + 4.43 + 3.89)(1077) = 0$$

$$-9.3B + 14539.5 = 0$$

$$B = 1563.39 \text{ kg}$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A + B - 3(1077) = 0$$

$$A + B = 3231$$

$$A = 1667.61 \text{ kg}$$

Calculo de la cortante, V, y del momento flexionante,  $M_F$ .

Se considerará que la distancia x se mide desde el punto A (lugar de aplicación de la reacción A).

Para  $0 \leq x \leq 0.25$

$$V = 1667.61$$

$$M_F = 1667.61x$$

Para  $0.25 \leq x \leq 4.68$

$$V = 1667.61 - 1077 = 590.61$$

$$M_F = 1667.61x - 1077(x - 0.25) = 590.61x + 269.25$$

Para  $4.68 \leq x \leq 8.57$

$$V = 1667.61 - 1077 - 1077 = -486.39$$

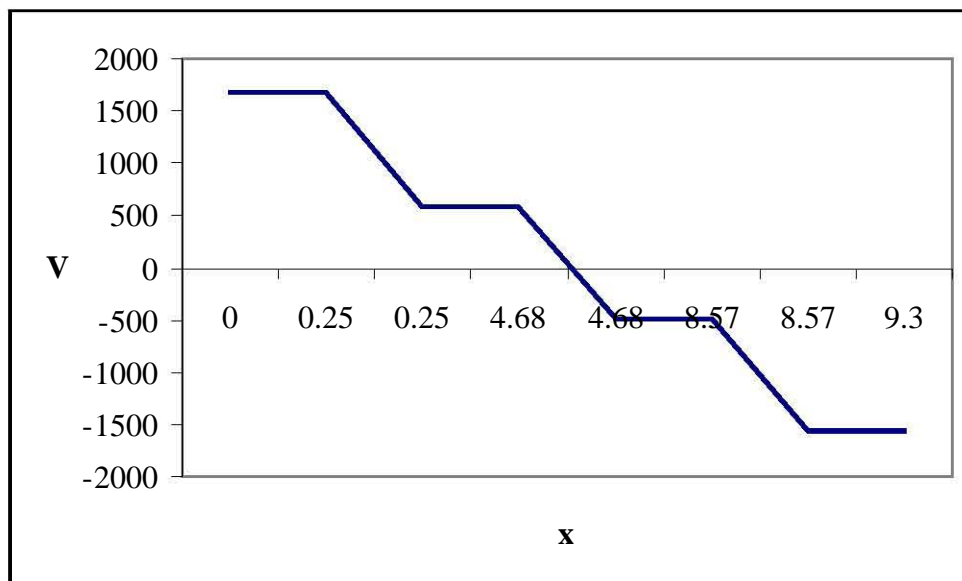
$$M_F = 1667.61x - 1077(x - 0.25) - 1077(x - 4.68) = -486.39x + 5309.61$$

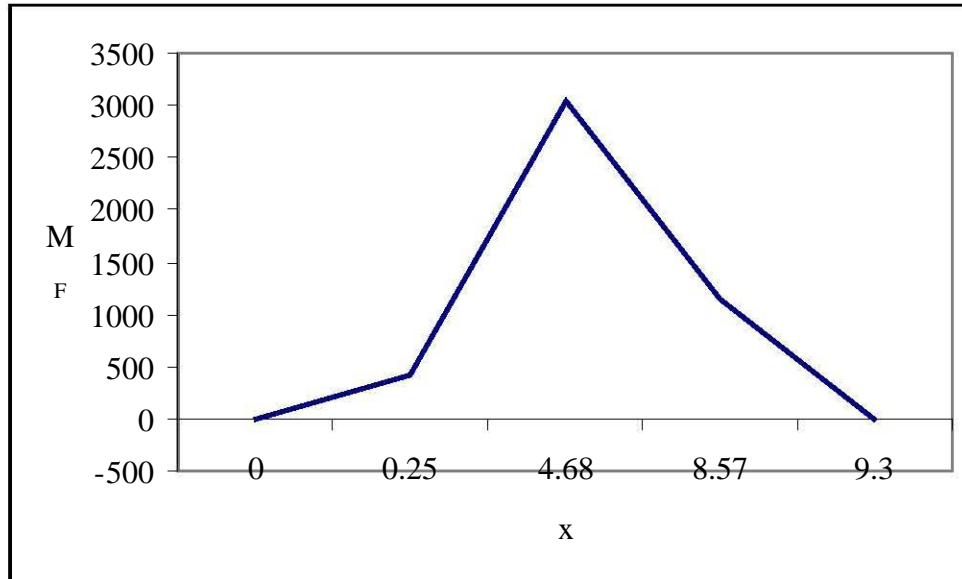
Para  $8.57 \leq x \leq 9.3$

$$V = 1667.61 - 1077 - 1077 - 1077 = -1563.39$$

$$M_F = 1667.61x - 1077(x - 0.25) - 1077(x - 4.68) - 1077(x - 8.57) = -1563.39x + 14539.5$$

Las gráficas de V y  $M_F$  se muestran a continuación.





El momento flexionante máximo se da en el punto donde  $x = 4.68$  m y es de  $3033.3$  kg·m ( $29756.67$  N·m)

El esfuerzo máximo de flexión se calcula con la siguiente forma:

$$\sigma = Mc/I \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo máximo de flexión,  $M$  el momento flexionante máximo,  $c$  es la distancia entre el eje neutro (eje donde los esfuerzos son cero o cambian de signo) y la fibra más alejada del perfil e  $I$  es momento de inercia.

Se propone el uso de una barra "I" de acero estructural.

El esfuerzo máximo que soporta el acero estructural es de  $200$  MPa (Ladner, 1996), se tomó el valor mínimo presentado para tener un mayor factor de seguridad.

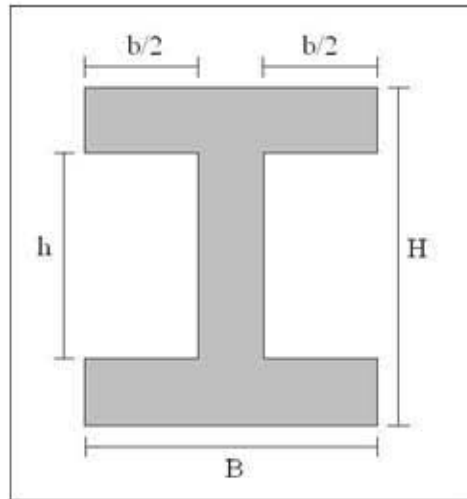
De (1) se tiene:

$$I/c = M/\sigma$$

Sustituyendo se tiene:

$$I/c = 29756.67 \text{ N}\cdot\text{m} / 200 \times 10^6 \text{ Pa} = 0.000148 \text{ m}^3$$

El momento de inercia de una barra “I” y la relación I/c son las siguientes:



$$I = (BH^3 - bh^3) / 12$$

$$I/c = (BH^3 - bh^3) / 6H \text{ (Marks, 1995)}$$

$$I/c = 0.000148 \text{ m}^3$$

$$(BH^3 - bh^3) / 6H = 0.000148 \text{ m}^3 = 9.079 \text{ in}^3$$

$$(BH^3 - bh^3) / H = 54.474 \text{ in}^3$$

De los perfiles “I” comerciales (Ladner, 1996) se seleccionó el W 5 X 19, el cual tiene las siguientes dimensiones:

$$B = 5.03 \text{ in}$$

$$H = 5.15 \text{ in}$$

$$b = 4.76 \text{ in}$$

$$h = 4.29 \text{ in}$$

$$I/c = 60.43 \text{ in}^3$$

Por lo tanto cumple con la relación I/c necesaria.

## Bibliografía

- ✓ Bambi, Basura de Oro, Plaza y Valdés Editores, México, 1993
- ✓ Barton. Resource recovery and recycling. John Wiley & sons, EUA, 1979
- ✓ Beras, A.C. Propuesta de mejora a la clasificación de los residuos sólidos domiciliarios para su separación en el DF, En preparación, México 2006
- ✓ Castillo Berthier Héctor F. La sociedad de la basura: Caciquismo en la ciudad de México, Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM, Cuadernos de Investigación Social No. 9, México, 1983
- ✓ Chan Uc, Marco Antonio, 2005. Encargado de la planta de composta de Méridoa, Yucatán. Consulta personal.
- ✓ Constantino, Onésimo, 2005. SETASA. Consulta personal
- ✓ JICA. Agencia de Cooperación Internacional del Japón, Gobierno del Distrito Federal de los Estados Unidos Mexicanos, Estudio sobre el Manejo de Residuos Sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos, Mayo 1999, Kokusai Kogyo Co. LTD
- ✓ Ladner, T.J. Archer, R.R. Mecánica de Sólidos, Mc Graw Hill, México, 1996
- ✓ López, Mauro, 2005. Dirección General de Servicios Urbanos. Dirección Técnica. Consulta personal.
- ✓ Marks, Manual del Ingeniero Mecánico, Mc Graw Hill, Colombia, 9ª edición, 1995
- ✓ Olvera, Miguel Angel, 2006. Grupo Ingamex. Consulta personal
- ✓ PGGIRS, Gobierno del Distrito Federal, Gaceta oficial del Distrito Federal, No 101-BIS, Programa General De Gestión Integral De Residuos Sólidos, 1 Octubre 2004
- ✓ Rhyner, Schwartz, et al. Waste management and resource recovery. Lewis, EUA, 1995
- ✓ Swartzbaugh, et al. Recycling equipment and technology for municipal solid waste. NDC, EUA, 1992
- ✓ Tchobanoglous, G. Integrated Solid Waste Management. Mc. Graw Hill, EUA, 1993
- ✓ Velsilind, A. Rimer, A. Unit operations in resource recovery engineering. Prentice-Hall, EUA, 1981

## *Leyes*

- ✓ LRSDF, Gobierno del Distrito Federal, Gaceta oficial del Distrito Federal, No 33, Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 22 Abril 2003
- ✓ LGPGIR, Gobierno Federal, Diario oficial de la federación, Ley General Para La Prevención Y Gestión Integral De Los Residuos, 8 Octubre 2003

## *Páginas electrónicas*

- ✓ Blanca Almaguer “Basura: un problema con el que nadie se quiere ensuciar” [http://www.ecoportel.net/articulos/basura\\_prob.htm](http://www.ecoportel.net/articulos/basura_prob.htm), fecha de consulta: 30/8/2004
- ✓ BANAPA-Net, <http://www.impi.gob.mx/impi/jsp/indice.jsp>, fecha de consulta: 10/10/2004
- ✓ Energy Information Administration/Renewable Energy Annual 1996 “Municipal solid waste profile”, fecha de consulta: 4/9/2004
- ✓ <http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/page/mswaste/mswprofile.pdf>
- ✓ Instituto Nacional de Ecología “Elementos para una política nacional de manejo de residuos urbanos”, (9/08/2002), fecha de consulta: 28/9/2004
- ✓ [http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/gaceta36/g9536391.html?id\\_pub=230](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/gaceta36/g9536391.html?id_pub=230)
- ✓ Naval Facilities Engineering Service Center “Waste separation using trommel screens” (9/03) [http://p2library.nfesc.navy.mil/P2\\_Opportunity\\_Handbook/7\\_II\\_A\\_4.html](http://p2library.nfesc.navy.mil/P2_Opportunity_Handbook/7_II_A_4.html), fecha de consulta: 4/9/2004
- ✓ Tom L. Richard, Department of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University “Municipal Solid Waste Composting: Physical Processing Fact” (5/5/1998) <http://www.lombricultura.net/biblioteca/Compostaje%20Residuos%20s%F3lidos.pdf>, fecha de consulta: 17/9/2004
- ✓ SEMARNAT, Cruzada nacional por un México Limpio, fecha de consulta: 15/05/05, <http://www.semarnat.gob.mx/estados/slp/mexicolimpio/contacopio.htm>