CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

MÉTODOS PARA LA SEPARACIÓN DEL PVC CONTAMINANTE EN EL RECICLADO DEL PET

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

LIDIA LARA ALVAREZ

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2009**

284

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

MÉTODOS PARA LA SEPARACIÓN DEL PVC CONTAMINANTE EN EL RECICLADO DEL PET

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

LIDIA LARA ALVAREZ

ASESOR:

M.C. ADRIÁN MÉNDEZ PRIETO

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2009**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

MÉTODOS PARA LA SEPARACIÓN DEL PVC CONTAMINANTE EN EL RECICLADO DEL PET

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

LIDIA LARA ALVAREZ

EVALUADORES:

M.C Ma. Luisa López Quintanilla **M.C Rafael Aguirre Flores**

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2009**

INDICE

1. INTRODUCCION 1

2. REVISION BIBLIOGRAFICA 5

2.1 Separación Manual 6

2.2 Separación por Diferencia de Densidades o Flotación 10

2.2.1 Separación por Flotación 10

2.2.2 Medios de Separación 11

2.2.3 Separación por Flotación-Espumado 12

2.3 Separación Óptica 14

2.3.1 Clasificación Óptica 14

2.3.2 Marcación Molecular 16

2.4 Separación Electrostática 18

2.4.1 Separación Triboeléctrica 18

2.5 Separación Automática 22

2.5.1 Rayos X 22

2.5.2 Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR) 24

2.6 Separación por Disolución Selectiva 27

3. ESTADO ACTUAL DEL ARTE 31

3.1 Separación por Flotación 31

3.2 Separación Triboeléctrica 39

3.3 Separación por Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIR) 42

3.4 Separación por Rayos X 43

4. CONCLUSIONES 45

5. APENDICE 46

6. BIBLIOGRAFIA 47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1- Efecto Contaminante del PVC en la Viscosidad Intrínseca del PET Reciclado.... 2
Figura 2- Técnicas de Separación.... 5
Figura 3- Separación Manual 6
Figura 4- Clasificación Negativa.... 7
Figura 5- Clasificación Positiva 7
Figura 6- Códigos 9
Figura 7- Separación por Flotación 12
Figura 8- Separación Flotación-Espumado 13
Figura 9- Sistema de Separación por Color Mistilínea 5000 LB/HR.... 15
Figura 10- Equipo de Separación Triboeléctrico.... 19
Figura 11- Principio del Tambor Triboléctrico (Hamos GMBH Germany) 20
Figura 12- Sistema de Separación XRF para Botellas PVC.... 23
Figura 13- Esquema de un Sistema NIR 25
Figura 14- Espectro Característico del PET 26
Figura 15- Espectro Característico del PVC.... 27
Figura 16- Mesa Vibratoria Húmeda.... 31
Figura 17- Sistema de Tratamiento de Flama.... 32
Figura 18- Medición del Ángulo de Contacto con Tratamiento a la Flama.... 33
Figura 19- Proceso de Recuperación de PET y PVC 35
Figura 20- Diagrama de Flujo para la Recuperación de Plásticos con la Combinación de los Métodos de Flotación de tres Etapas y Flotación Selectiva 37
Figura 21- Diagrama de Flujo para el Proceso Flotación Espumado para la Recuperación Selectiva de PET de Mezclas PET/PVC 38
Figura 22- (a) Tabla Vibratoria; 39
Figura 23- Diagrama del Sistema Experimental para la Separación Electrostática del PVC en Mezclas PVC/PET 41
Figura 24- Imágenes de Transmisión Óptica de Envases de PET y PVC 44

INDICE DE TABLAS

Tabla 1- Intervalos de Densidades de Plásticos Comunes 11
Tabla 2- Constantes Dieléctricas de Plásticos Seleccionados a 1 MHz 18
Tabla 3- Separación por Etapas.... 21

1. INTRODUCCION

La presencia de los materiales plásticos en todas las áreas de consumo, además de sus períodos cortos de utilización, han motivado a considerar el problema de los residuos sólidos y la contaminación ambiental que originan.

Durante los últimos años, se ha hecho cada vez más evidente que las materias primas no son inagotables. Este hecho incide en la necesidad de economizarlas, siendo este el objetivo primordial del sector industrial así como de la sociedad, por lo que cada vez es más necesaria la recolección y reutilización de los desechos plásticos.

Entre los principales materiales plásticos con mayor interés en su reciclado es el PET debido a los grandes volúmenes generados por su diversidad de aplicaciones.

El PET se emplea para fabricar botellas de refresco, agua, salsas, jugos, cervezas, etc. También se utiliza para hacer películas, fibras, láminas, productos termoformados, etc. Por ser una resina de condensación, su costo es mayor que el de las resinas de consumo masivo. Por esta razón, además de sus grandes volúmenes generados, el material reciclado tiene un mayor precio en el mercado.

El uso del PET reciclado esta condicionado a los requerimientos de pureza. Generalmente la contaminación no puede ser tolerada en aplicaciones como fibra o botellas debido a los problemas de fallas mecánicas por rompimiento y consideraciones estéticas.

La eficiencia en el reciclado del PET se ve afectada directamente por la presencia de diversos contaminantes, entre los que destacan por su efecto negativo durante el reprocesamiento del PET, la formación de compuestos ácidos, la humedad y con mayor énfasis la presencia de PVC.

Contaminantes como etiquetas, adhesivos, EVA, papel, a temperaturas elevadas generan compuestos ácidos que catalizan la hidrólisis del PET. Las hojuelas de botellas de PVC generan HCl, mientras que el EVA del empaque de las tapas produce ácido acético representando un grave problema en el reprocesado del PET.

La humedad deberá estar por debajo de 0.02% para evitar la reducción en el peso molecular por hidrólisis. Cualquier cantidad de humedad que no se devolatizó antes de fundir el PET reacciona inmediatamente reduciendo la viscosidad a niveles inaceptables en el procesado de botellas.

Por otra parte y con mayor interés para el presente estudio el efecto contaminante del PVC en el PET. El PET y el PVC son de los materiales mayormente encontrados entre los plásticos reciclados. Sin embargo, son contaminantes mutuos puesto que las densidades tanto del PET y PVC son muy similares y se traslapan, (el rango de la gravedad específica del PET es de 1.34-1.36 g/cm^3 y la del PVC (1.30-1.37), consecuentemente no pueden ser separados a través de procesos físicos ordinarios tales como flotación en agua o elutriación con aire, por lo tanto deberán ser separados por medios más sofisticados.

El PVC no es estable a la temperatura de proceso del PET (aproximadamente 280°C). A estas temperaturas en el PVC se promueve la dehidroclorinación, con una evolución copiosa de HCl. La presencia de cantidades mínimas de PVC (100ppm) en PET recuperado puede originar serios problemas de decoloración en el PET durante su fase de secado, contaminando al plástico con manchas negras durante la extrusión. El PVC ejerce una reducción en la viscosidad en fundido, reflejada por una reducción en la viscosidad intrínseca de PET como se puede apreciar en la siguiente figura 1.

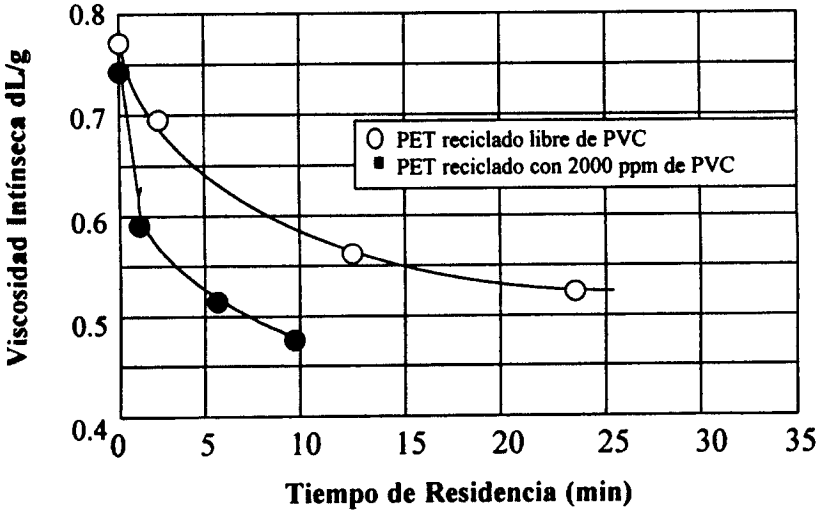

Figura 1- Efecto Contaminante del PVC en la Viscosidad Intrínseca del PET Reciclado.

La viabilidad económica del reciclado de los materiales plásticos depende del desarrollo de un método de precio bajo y rápido para la clasificación de envases molidos y sucios. La mayor parte de materiales reciclables provienen de mezclas aleatorias de diversos tipos de plásticos, sin embargo los procesos de reciclado generalmente requieren de un solo material para ser reutilizado. Por lo tanto, el primer paso en el proceso de reciclado es la clasificación de los diferentes materiales en la corriente de entrada.

En la actualidad los procesos de clasificación son de trabajo intensivo y representan una porción significativa de los costos asociados con el reciclado. Por lo que la automatización del proceso y separación mejorará los márgenes de ganancia al ser trasladados a mayor escala.

La clasificación de los desechos plásticos es una parte fundamental del reciclado de los polímeros, debido a los diferentes tipos de plásticos usados y al hecho de que la mayoría de éstos no son compatibles unos con otros. El precio que los fabricantes de productos plásticos están dispuestos a pagar por el plástico reciclado, depende del precio relativo del mercado de la resina virgen contra el material reciclado y de la calidad del producto separado y clasificado.

Los plásticos mezclados generalmente tienen bajo valor de venta y permiten productos con propiedades variables y deficientes, mientras que las corrientes de materiales separados pueden utilizarse en aplicaciones con un valor más alto de venta. Aún con un 1% de un polímero incompatible puede ser suficiente para degradar las propiedades de un lote completo de reciclado. La separación es también necesaria para aquellos productos plásticos diferentes que son mecánica, química o térmicamente unidos.

Los métodos para la identificación y clasificación de los desechos plásticos van desde la clasificación manual y la separación por flotación hasta tecnologías automatizadas más avanzadas. Las técnicas de separación y clasificación usualmente se basan en la diferencia entre las propiedades químicas, ópticas, eléctricas y/o físicas de los diferentes plásticos a separar.

Una diversidad de métodos se encuentra disponible para la clasificación de plásticos de post-consumo, puesto que un solo método no puede satisfacer todos los criterios requeridos (polímeros diferentes, grado de pureza de las corrientes de materiales a separar, velocidad de producción, costo de equipos etc.) Por ejemplo, la separación óptica puede clasificar en base al color o transparencia, sin embargo presenta información respecto a la identidad química del polímero. Mientras que el método de fluorescencia de Rayos-X solo puede clasificar PVC entre otros plásticos de la corriente.

Muchos de los procesos de separación física para residuos plásticos mezclados, confían en aprovechar una propiedad única que tiene el polímero (como la densidad, la hidrofobicidad y la presencia de cloro) o una propiedad específica del polímero, la cuál varía con la temperatura (punto de función, solubilidad).

Un método comercial adecuado para la clasificación de los plásticos necesita ser rápido, confiable, económico y también lo suficientemente flexible para adecuarse a varias formas de contaminación, así como a la variación de color.

Los sistemas de clasificación automatizada son esenciales para la separación económica de productos plásticos tanto en el reciclado de materiales de alto consumo, como en aplicaciones de los plásticos de ingeniería, los cuales pueden beneficiar la identificación sin ambigüedad en los casos de productos estampados o etiquetados con materiales diferentes.

El presente trabajo se centra principalmente en el reciclado y separación de los envases de PET, particularmente a la separación del PVC que tiene un gran efecto degradante durante el reciclado del PET.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

Técnicas de Separación

Las técnicas de clasificación de plásticos se basan en las diferencias que hay en las propiedades físicas o características superficiales de los plásticos a ser separados. Muchas de las técnicas utilizadas actualmente, son mediante separación por diferencias de densidades, por flotación y por triboelectrificación, las cuales fueron desarrolladas originalmente para la separación de minerales. La demanda de los productos plásticos de alta pureza ha conducido a que estos procesos hayan tenido que ser modificados y en algunos casos mejorados significativamente. Por ejemplo clasificadores automáticos para plásticos basados en métodos espectroscópicos y técnicas de identificación asociadas, han sido desarrollados a nivel de sofisticación no encontrada en la industria minera.

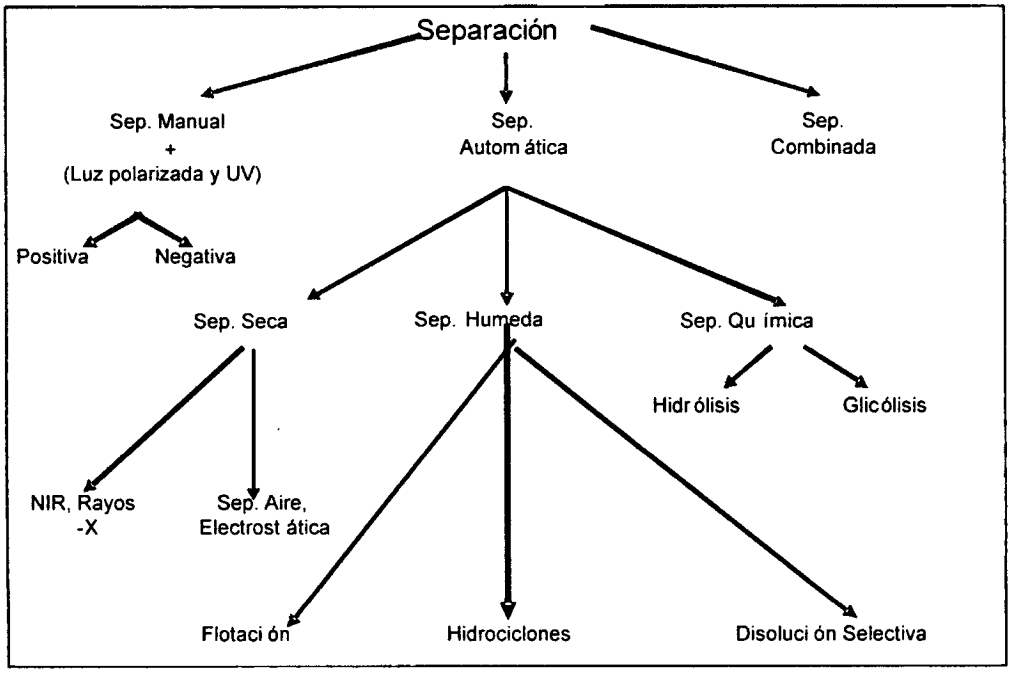

Figura 2- Técnicas de Separación

2.1 Separación Manual

Gran cantidad de plásticos son clasificados a mano. La separación manual es un proceso simple el cual requiere de poca tecnología, dejando una amplia visión para realizar mejoras. Consiste en un método ineficiente y de labor intensa en la separación de los materiales plásticos. (1)

Un camino para la identificación fácil de los plásticos es marcar los moldes. Las botellas de plástico deben llevar un código que los identifique, esto con la finalidad que puedan ser clasificados manualmente. Este tipo de separación requiere de equipo pequeño y de precisión en la labor humana, para lograr productos de alta pureza. Las botellas pasan a lo largo de una banda transportadora y así el operador identifica visualmente todos los productos y posteriormente poder clasificar a los polímeros por categoría. Requiere de poco capital, es una labor lenta. (2)

Figura 3- Separación Manual

Los métodos manuales de separación son generalmente de dos tipos: sistemas de separación positivo y negativo. En un sistema de separación positivo las botellas de PET son removidas de una corriente de envases plásticos conducidos sobre un sistema transportador. Mientras en un sistema de separación negativo las botellas de PET continúan en el transportador y los materiales contaminantes son removidos de la línea del transportador.

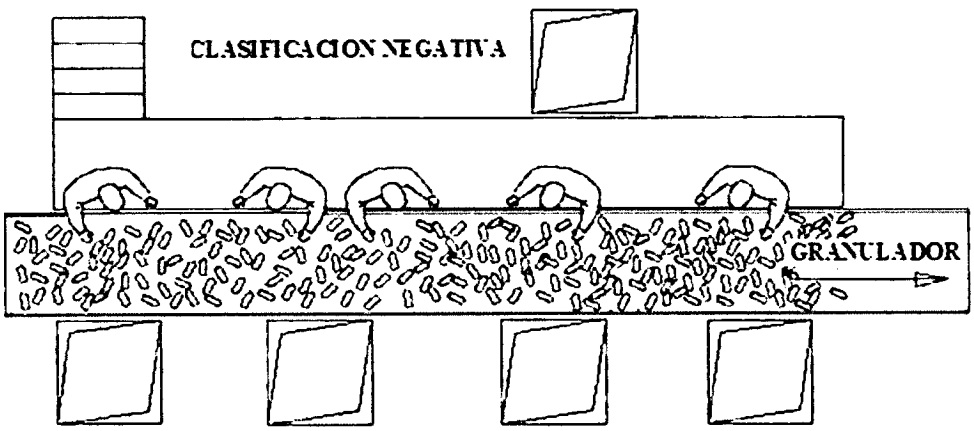

Figura 4- Clasificación Negativa

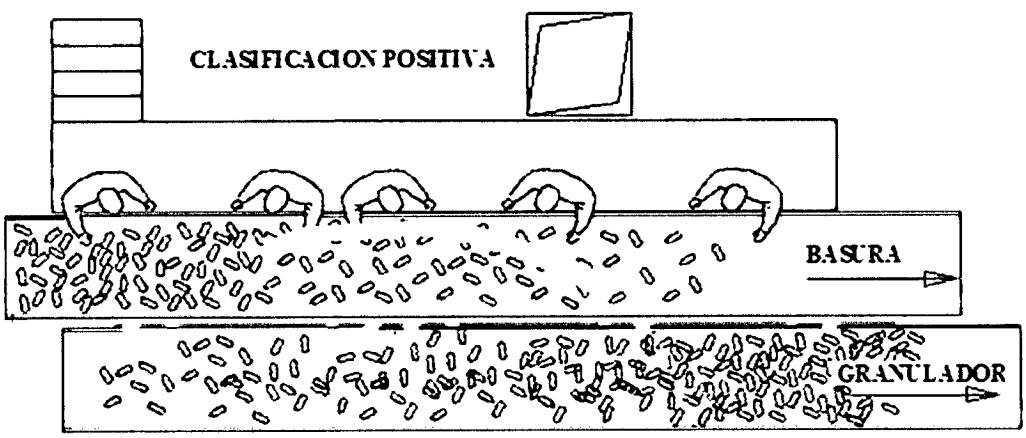

Figura 5- Clasificación Positiva

Cuando las botellas de PET son removidas en un sistema de separación manual positivo, estas son alimentadas directamente a un molino o en un segundo transportador que alimenta a otro molino. La ventaja de un sistema donde los inspectores de línea alimentan a un segundo transportador, es que éste puede ser diseñado para incorporar un sistema de separación automática como un chequeo final principalmente para PVC antes de ser molido.

Aunque en la industria del reciclado de plásticos, los sistemas de separación positivos son considerados mejores en la generación de materiales de mayor calidad, no siempre pueden resultar en el sistema más eficiente, ya que generalmente consumen más tiempo que el sistema de separación negativa. La capacidad de separación del personal de planta trabajando en líneas manuales, es función de la calidad de entrada de los materiales, del sistema de diseño y la velocidad de la cinta transportadora.

Los sistemas manuales de separación negativa, son generalmente considerados por tener un nivel de contaminación potencialmente mayor, por lo que deben configurarse tanto sistemas como corrientes de contaminantes que hayan sido detectados y así por último, descargar los materiales ya separados en el transportador directo a un compactador ó a un molino.

Los sistemas manuales de separación negativa, se consideran como una buena alternativa cuando los materiales han sido sometidos a una separación previa. Algunos sistemas de separación negativa son diseñados para tener inspectores en ambos lados de la banda transportadora que alimenta directamente a un compactador o un molino para incrementar la producción de material.

Es muy importante una buena selección de las botellas debido a que si el PET se contamina con PVC, su valor comercial disminuirá drásticamente, y dependiendo de su nivel de contaminación puede no ser de utilidad. En la etapa de identificación, la separación de las botellas de PET de las PVC es relativamente fácil, sin embargo una vez que estén molidas, la separación es casi imposible, debido a que los pesos específicos de estos dos materiales son muy similares.

También es importante llevar el material a un equipo en donde se desprendan las etiquetas de la botella, este procedimiento se lleva a cabo mediante el uso de un baño de agua, antes se perforan las botellas con la finalidad de que el agua penetre en su interior y se aplasten con facilidad y mejorar así su transporte.

Uno de los problemas principales de este sistema, se debe a que la fuerza de trabajo que participa en la clasificación, presenta un alto índice de rotación. Provocando una mala selección por parte de personal, y por consiguiente se refleja en la deficiente eficiencia del sistema.

Para diferenciar entre los tipos de resinas utilizadas en la elaboración de las botellas y demás productos plásticos, se emplean códigos establecidos por (SPI) para las resinas más comunes.

Figura 6- Códigos

2.2 Separación por Diferencia de Densidades o Flotación

2.2.1 Separación por Flotación

El sistema de flotación es un método de separación simple para materiales de diferentes densidades. El método implica depositar el material en un tanque lleno de agua o de otro líquido como soluciones salinas o mezclas de agua con alcohol. El material más ligero flota y el pesado se hunde. Para que el sistema de flotación trabaje eficientemente las densidades de los materiales deben ser diferentes entre sí. El PET y el PVC tienen densidades muy similares, por consiguiente no pueden ser separados por el sistema normal de flotación. (3)

Como se mencionó la separación por diferencia de densidad es un método práctico para la separación de ciertos tipos de plásticos con un costo relativamente bajo.

Mediante una modificación cuidadosa de la densidad del medio, es posible la separación de los materiales plásticos, utilizando soluciones salinas o suspensiones de partículas finas, proporcionando así la densidad con una diferencia razonable. La variación es parcialmente una función de las cargas minerales incluídos en el plástico.

Cuando un líquido presenta muy alta compresibilidad cerca de su punto crítico, permite que su densidad se modifique con cambios mínimos en la temperatura y presión. Los plásticos con densidad similar pueden ser separados ajustando la densidad de los líquidos, usualmente usando CO_2 a un valor entre los dos polímeros. La separación de los plásticos por diferencia de densidades puede ser acelerada por la centrifugación en lugar de la técnica de flotación.

Tabla 1- Intervalos de Densidades de Plásticos Comunes

Polipropileno	0.850-0.920	**PMMA**	1.160-1.200
LDPE	0.890-0.930	**PVC plastificado**	1.190-1.250
HDPE	0.940-0.980	**PC**	1.200-1.220
ABS	1.040-1.060	**PET**	1.380-1.410
PS	1.040-1.080	**PVC rígido**	1.360-1.400
Ny6, Ny66	1.120-1.160		

2.2.2 Medios de Separación

Medios de Baja Densidad

La separación de polietileno y polipropileno ha sido mediante el uso tanto de mezclas agua/alcohol y una suspensión de micro esferas de vidrio en agua. En trabajos previos se utilizó una suspensión de micro tubos de vidrio con un tamaño de 52 μm y una densidad de .210 gr/cm^3 para separar HDPE y PP en un hidrociclón de 100mm. El principal problema fue la tendencia de romperse los micro tubos de vidrio utilizados, sin lograr la modificación en la densidad esperada.

Medios de Alta Densidad

Para obtener medios de separación de densidades mayores que el agua se han sugerido soluciones salinas y suspensiones de partículas de calcita, cloruro de sodio, cloruro de zinc, etc. Por ejemplo el uso de nitrato de sodio con densidad de 1.3 gr/cm^3 ha sido propuesto para la separación de materiales poliméricos como el PVC y el PET

Una limitación de este método es que muchos polímeros tienen equivalencia o densidades muy similares, como es el caso del PET y el PVC en los cuales sus densidades se traslapan. Así mismo, este método es de uso limitado en el caso de plásticos que contengan cargas, pigmentos y agentes reforzantes ya que estos aditivos modifican la densidad del polímero.

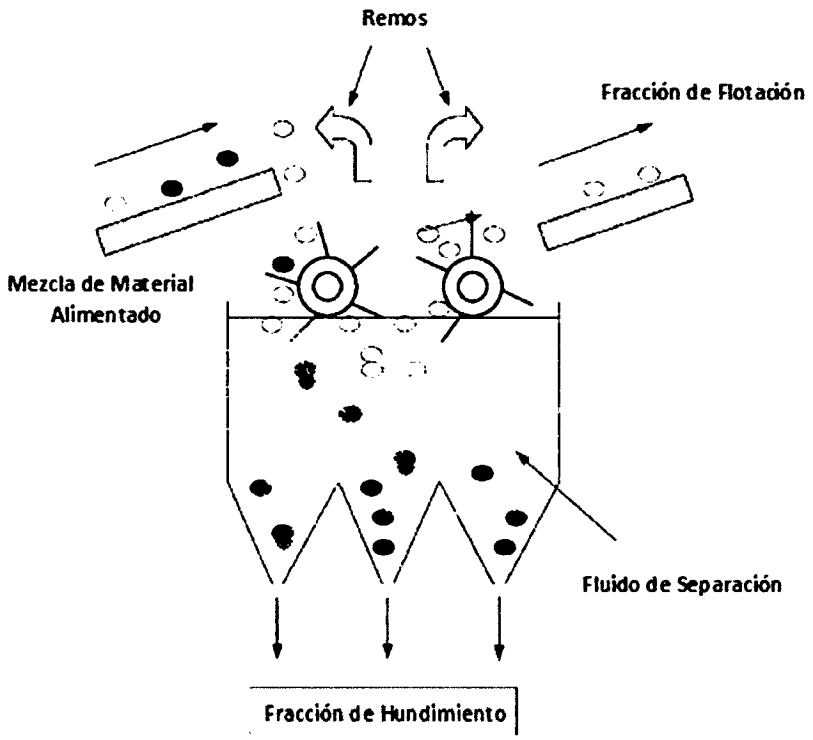

Figura 7- Separación por Flotación

2.2.3 Separación por Flotación-Espumado

Flotación-Espumado es un método que trabaja de forma similar a la separación por flotación. En la flotación-espumado el material que se va a separar, primero debe ser tratado con un surfactante, luego suspenderse en agua, ya que al reaccionar con el material surfactante los plásticos que normalmente se hunden en el agua son suspendidos en la mezcla con agua. El aire es bombeado dentro del sistema, y las burbujas de aire se adhieren a algunas partículas dependiendo del tipo de resina, causando que las partículas floten en la superficie. Los materiales que no son afectados por las burbujas se hunden en el fondo, permitiendo recolectar el material ya separado en la parte superior e inferior del sistema. (3)

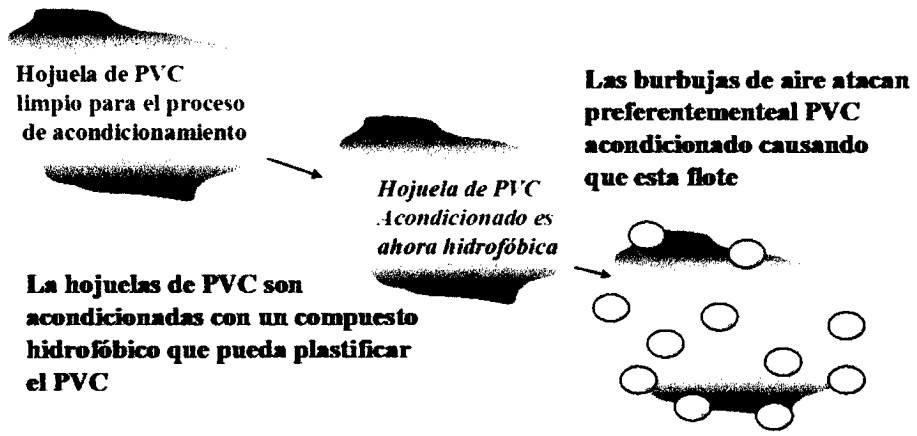

Figura 8- Separación Flotación-Espumado

Se ha encontrado que las soluciones alcalinas como el hidróxido de sodio pueden destruir la flotación del PET, mientras que el PVC solo presenta pequeños efectos. Una tecnología envuelve el tratamiento en las partículas del PET y el PVC con soluciones alcalinas seguido de la Flotación-Espumado de PVC con surfactantes no iónicos. Los pasos de esta tecnología requieren de condiciones experimentales apropiadas, como son; concentraciones, temperatura y tiempo de residencia. Así mismo la adición de solventes que son adsorbidos por el PVC para reducir la densidad, ha sido propuesta a favor de la separación del PVC y el PET por flotación selectiva. (4)

Las ventajas de este sistema son:

a) El proceso es muy simple
b) No requiere alta tecnología
c) Se usan químicos baratos
d) No provocan problemas serios al ambiente
e) Proceso eficiente para separar al PET del PVC

2.3 Separación Óptica

Los sistemas ópticos utilizan luz visible para separar botellas de plástico de HDPE por color. Los sistemas ópticos usan cámaras blancas y negras para la separación de un solo color, es decir cuando se requiere detectar botellas de color en una corriente de botellas no pigmentadas de HDPE natural.

Los sistemas de clasificación óptica que proporcionan separación de múltiples colores usan una cámara de color (5). Comercialmente existen sistemas disponibles que pueden clasificar una amplia variedad de colores incluyendo el color translúcido tenue de las botellas.

2.3.1 Clasificación Óptica

La clasificación óptica en proceso automático puede ser usada para separar hojuelas de polímero reciclado y contaminante en base al color o transparencia. Por ejemplo la clasificación por color puede separar entre PET de color y PET claro, entre hojuela de HDPE coloreada de botellas de detergentes y HDPE natural de botellas de leche, hojuelas de HDPE coloreadas dentro de un tipo de color específico, además puede separar entre tapas coloreadas de PP y de HDPE.

En 1993, la clasificación de hojuelas de plástico se incrementó por la demanda del mercado debido al rápido crecimiento del PET reciclado, con la finalidad de su posterior aplicación de empaques que estuvieran en contacto con la comida. Para satisfacer este mercado, es necesario utilizar materiales de PET de muy alta pureza, en lugar de PVC con ciertos contaminantes. En este respecto, la tendencia del uso PVC para decolorar puede ser aprovechado para efecto de la separación óptica de la hojuela de la mezcla de PET/PVC. Estos polímeros son claros, sin embargo el calentamiento de la mezcla a 204°C origina que el PET cristalice y se vuelva blanco, mientras el PVC experimenta una deshidroclorinación y se torne ligeramente café. Bajo estas condiciones, la hojuela de PVC puede entonces, ser separada de la hojuela del PET. Puesto que los contaminantes metálicos (fragmentos de aluminio) son opacos, estos pueden también ser separados de las hojuelas de plástico utilizando un instrumento de clasificación de color.

Los equipos clasificadores por color permiten a los recicladores obtener material reciclado muy homogéneo de un solo color, pureza y consistencia como la resina virgen. Sin embargo, mientras que el escaneo óptico de los plásticos de post-consumo puede clasificar los plásticos de acuerdo a la transparencia y color, estos son incapaces de proporcionar una identificación química del polímero.

La separación óptica de la hojuela de materiales reciclados puede resumirse de la siguiente manera:

La hojuela limpia y seca es alimentada a una fuente luminosa, después el detector mediante una banda transportadora identifica la naturaleza óptica de cada hojuela para presentar el criterio de selección. Los detectores son normalmente cámaras blancas y negras que están diseñadas en sistemas para remover contaminantes tales como papel y metal. La hojuela es separada por eyección de aire. Otros sistemas más sofisticados utilizan una variedad de filtros especiales y cámaras de color o cámaras infrarrojas, consistiendo de un arreglo de detectores

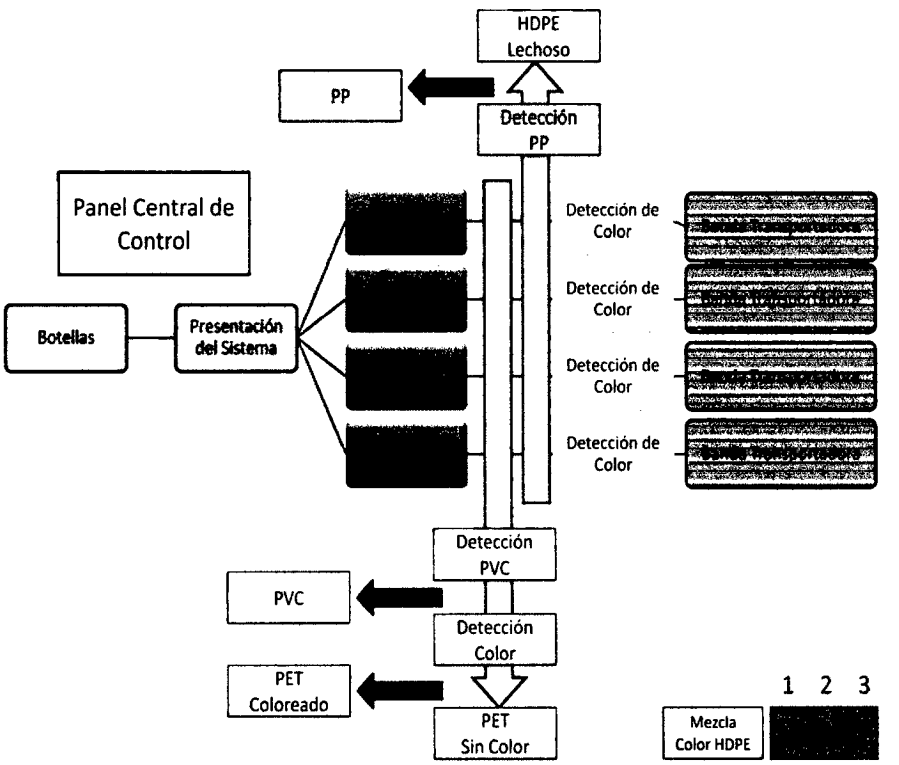

Figura 9- Sistema de Separación por Color Mistilínea 5000 LB/HR

2.3.2 Marcación Molecular

Este sistema ha sido propuesto por Eastman Chemical Company y Bayer para poder identificar y clasificar plásticos a bajo costo. La marcación molecular es introducida dentro de la base del polímero durante la síntesis inicial y permite la identificación subsiguiente del material plástico de post- consumo para el tipo y grado de resina. (6)

Un sistema similar trabaja con moléculas fluorescente y ha sido desarrollado con un proyecto de investigación en Europa. El material es identificado por la exposición de un haz de excitación, el cual emite señales fluorescentes características. Estas señales son analizadas por el sistema de identificación. Después un equipo de selección es activado, el cual rechaza el plástico no identificado y clasifica los plásticos por tipo.

En este sistema hay un límite práctico del número de marcadores que pueden ser usados para cada material, como la interacción química entre los marcadores puede impedir la identificación de los componentes del material. (7)

Se describe la tecnología de identificación óptica y clasificación automatizada de productos marcados con materiales fluorescentes en concentraciones de trazas. Un pequeño número de materiales en combinación binaria permite el marcado de un gran número de productos. El concepto ha sido aplicado para clasificar productos plásticos domésticos de diferentes tipos en un movimiento rápido de una corriente mixta. El desempeño de los sensores ópticos desarrollado en base a la determinación de las señales fluorescentes de algunos marcadores seleccionados en los productos, ha sido probado en la industria y en los sistemas de clasificación. Comercialmente es viable el tipo de clasificación y la pureza de la clasificación ha sido demostrada. (8)

La opción de una clasificación automatizada de los plásticos se basa en marcar el contenedor o la resina con algo que sea fácilmente detectable.

Un sistema de marcación consiste en marcar todos los contenedores con tinta invisible la cual se detecta fácilmente. Este sistema permite la separación por tipo de resina, color, paquete de aditivos de resina, así como el contenido del paquete. Este sistema es costoso inicialmente. Cada línea de producción de los envases debe instalar un sistema de marcado.

Además en cada reciclado se necesita instalar una máquina para buscar la marca de los contenedores. Existe otra alternativa que se está desarrollando, es un sistema que usa la marcación molecular para identificar el tipo de resina. El lado positivo de este método es que el costo puede ser relativamente bajo, sin embargo se incrementa con la adición del marcador de la resina, y su sistema podría solo requerir material reciclado y resina manufacturada. (9)

Los requerimientos generales para marcadores potenciales son:

- No deberán fluorecer bajo condiciones de luz normal o absorber luz en el espectro visible de tal manera que el plástico coloreado no afecte.
- Tener estabilidad bajo temperaturas extremas.
- Las emisiones no deben interactuar entre marcadores fluorescentes distintos, un efecto conocido como templado (quenching).
- No deberá tener efecto en las propiedades físico-químicas de los materiales plásticos.
- Produce una señal fluorescente distinta en el espectro visible después de la excitación con la luz UV.

2.4 Separación Electrostática

2.4.1 Separación Triboeléctrica

Los métodos electrostáticos han sido utilizados desde 1970 en la separación mezclas residuales de plástico. La separación electrostática es un método que separa materiales plásticos a través de la diferencia en las cargas electrostáticas, es decir, la separación cuando uno de los materiales adquiere carga positiva y el otro adquiere carga negativa. (4)

Los métodos de clasificación electrostática se basan en el hecho de que dos materiales diferentes no conductivos al ser frotados adquieren pequeñas cargas opuestas por transferencia de electrones. El material con mayor constante dieléctrica se vuelve más positivo y el material con la constante dieléctrica es cargado negativamente. La constante dieléctrica es afectada por la adición de aditivos y cargas. La partícula del material con mayor constante dieléctrica es cargada positivamente contra la partícula con menor carga, esto es referido como carga triboeléctrica.

Tabla 2- Constantes Dieléctricas de Plásticos Seleccionados a 1 MHz

Tipo de plástico	Constante dieléctrica
Polipropileno	2.2-2.6
Polietileno de alta densidad	2.3-2.4
Poliestireno	2.4-3.1
PVC rígido	2.7-3.1
PET	3.0
Nylon 66	3.4

Los materiales son separados al caer libremente en un campo eléctrico producido entre dos electrodos paralelos cargados opuestamente y separados de acuerdo a la carga triboeléctrica que poseen. Un problema presente es la dificultad para controlar la fuerza gravitacional que actúa durante la caída de las partículas. Por lo tanto, si las partículas son demasiado pequeñas o con poca carga, requerirá de una mayor área de separación entre los electrodos.

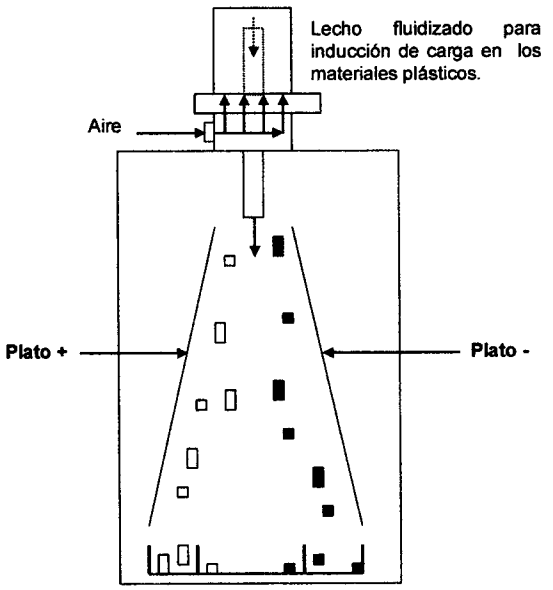

Figura 10- Equipo de Separación Triboeléctrico

En otros sistemas el material es introducido a un pre-cargador para asegurar una máxima carga superficial. Las partículas pre-cargadas caen a través de un campo eléctrico creado por un tambor-electrodo rotativo y un plato electrodo cargado opuestamente permitiendo así la separación de los materiales. El material atraído por el tambor rotatorio es adherido a su superficie, mientras que el otro material cae atraído sobre el plato con polaridad diferente. Entre las ventajas del sistema de separación electrostática se encuentran el hecho de consistir en una técnica en seco que, puede separar una variedad de diferentes plásticos si la carga triboeléctrica de los materiales es posible y aunque el procesado se lleva acabo utilizando alto voltaje, el consumo total de potencia es muy bajo debido a que el máximo de corriente es limitado a 4 mili amperes.

Estos sistemas de separador triboeléctrico se pueden emplear para separar mezclas de hojuela de PET y PVC. El PVC desarrolla una carga negativa relativa al PET y mediante un ajuste apropiado de los electrodos se permite una buena separación entre ambos materiales.

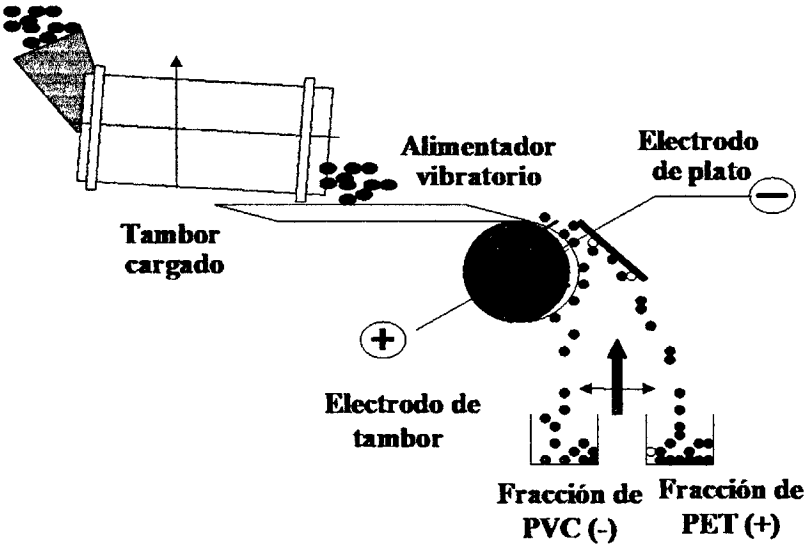

Figura 11- Principio del Tambor Triboléctrico (Hamos GMBH Germany)

En la siguiente tabla se muestran resultados de una prueba piloto utilizando PET con una concentración de PVC de 9100 ppm realizando la separación en dos etapas.

Tabla 3- Separación por Etapas

	% de Recuperación		Contenido de PVC ppm		Eficiencia de separación
	Tambor	Electrodo	Tambor	Electrodo	
1ª Etapa	12%	88%	66,381	1,373	85%
2ª Etapa	12%	88%	8,322	426	70%
Total	22%	82%	38,972	426	98%

2.5 Separación Automática

2.5.1 Rayos X

Existen varios tipos de clasificación automatizada. Estos sistemas emplean algún tipo de detección de señal, la cual puede diferenciar las botellas de plástico, basándose en las propiedades químicas o físicas de los polímeros, cuando la señal es detectada y analizada por un sensor.

Para el uso de los sistemas de clasificación automatizada se deben obedecer los requerimientos de regulación de seguridad, ya que todos los sistemas de clasificación automatizada que utilizan detección de frecuencia electromagnética como la radiación, deben de proteger adecuadamente a los trabajadores de la exposición a esa radiación. El uso de los sistemas de clasificación de Rayos-X debe estar registrado con la Comisión Reguladora Nuclear.

La detección de Rayos-X generalmente se considera como el método más confiable de clasificación binaria para remover el PVC de la corriente de las botellas de PET. Esto gracias a que el sensor de Rayos –X solo detecta la presencia del átomo de cloro que se encuentra en las botellas de PVC, los cuales están ausentes en las botellas de PET, pero no para identificar otro tipo de resinas plásticas.

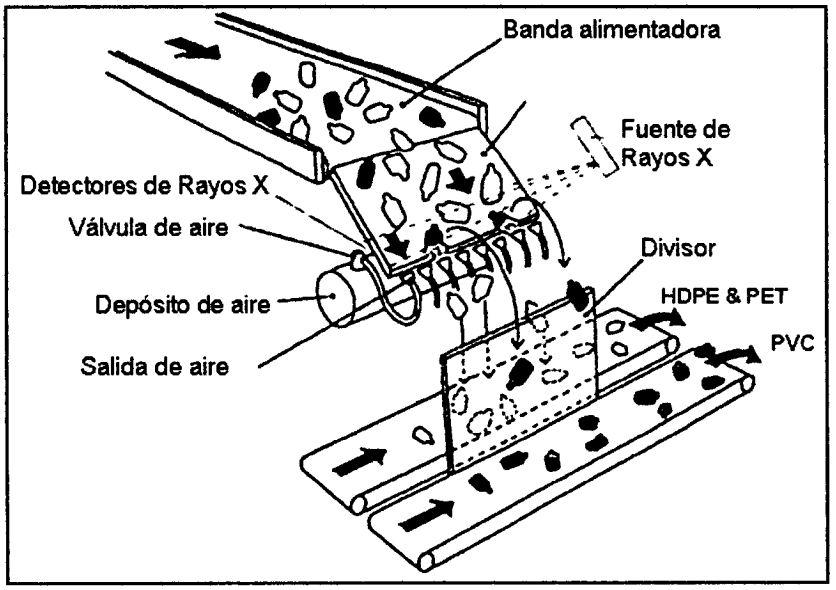

Figura 12- Sistema de Separación XRF para Botellas PVC

Hay dos tipos de detectores de Rayos-X, el primero son los Rayos-X de transmisión (XRT) y los segundos son los Rayos-X fluorescencia (XRF). XRT las señales pasan a través de la botella y son leídas por un sensor en el otro lado. Como las señales pasan a través de la botella, se ignora las etiquetas y otros contaminantes superficiales que puedan presentar falsas lecturas con otros sistemas de detección. Esta tecnología tiene ciertos beneficios, ya que puede leer el contenido químico de la botella cuando están atrapadas juntas, lo cual es muy común cuando las botellas son aplastadas. Por ejemplo si una botella de PVC se ha quedado atascada en el fondo de una botella de PET y cuando pasa por el sensor este detectara la botella de PVC y las dos botellas serán desechadas. (10)

El inconveniente del sistema XRT es que las botellas aplanadas o parcialmente aplanadas pueden dispersar la detección del haz, lo cual impide que el sensor obtenga la lectura en el otro lado. Y este sistema está programado para expulsar botellas que no se pueden leer. Una manera de evitar la pérdida de botellas de PET, es que las botellas que pudieran estar pegadas y fueran desechadas se separaran de forma manual.

Para el sistema de detección de XRF la señal de los Rayos-X rebota en la superficie de la botella y la señal reflejada es leída por un sensor. La limitante del escaneo de la superficie es que no detecta las botellas de PVC que se encuentra protegida con la señal de otra botella. Del mismo modo no, detecta una botella de PVC que esta pegada a la parte de atrás de una botella de PET cuando pasa por el sensor. Las señales de rastreo en las

superficies pueden ser afectadas por los contaminantes en la superficie como son las etiquetas y las tapas, provocando que las botellas sean desechadas incorrectamente.

2.5.2 Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR)

De acuerdo a consideraciones expuestas en el reporte de la APME Bruselas 1998, los métodos de espectroscópica infrarroja cercana (rango espectral de 700-2500nm) son los métodos de identificación más ampliamente utilizados para la clasificación automatizada de plásticos.

Una variedad de enlaces químicos (O-H, N-H, y CH) absorben la luz en esta región y es bien conocido que un análisis de absorbancia NIR puede ser utilizado para obtener información de la estructura química de una muestra.

Quedó demostrado que el nivel de contaminación superficial típica encontrada en las corrientes plásticas residuales, tales como etiquetas, adhesivos, tierra etc., no afecta el espectro de la muestra. La espectroscopia infrarroja cercana reflectiva (NIR) es la tecnología preferida seleccionada para botellas sucias, donde no es posible el uso de sensores de transmisión de rayos-X

La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) ofrece alta identificación de los diferentes polímeros e incluso los diferentes grados del polímero. (11)

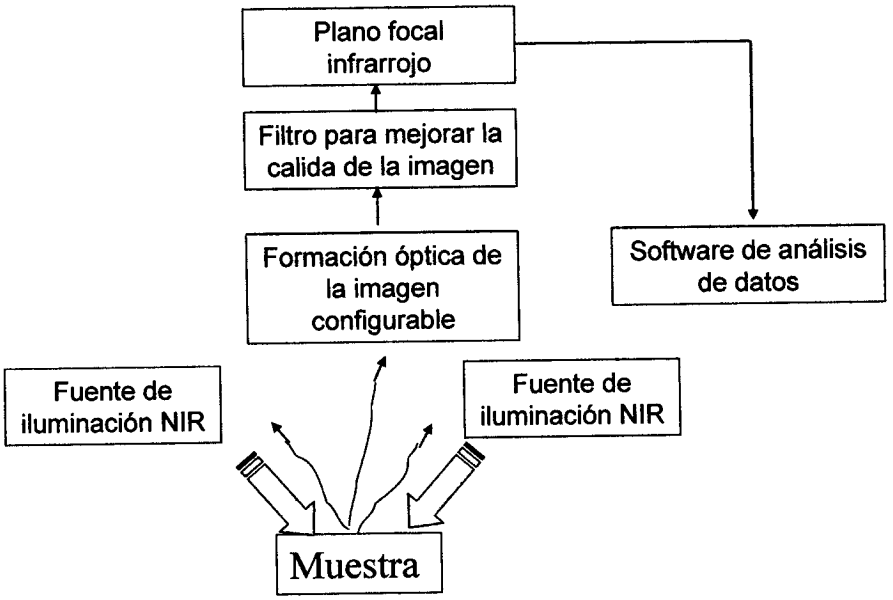

Figura 13- Esquema de un Sistema NIR

NIR es una porción de espectro de luz que es invisible para el ojo humano. Cuando las botellas de plástico son expuestas a las señales de NIR cada resina de plástico absorbe la luz, además el NIR puede diferenciar entre un amplio rango de tipos de resinas plásticas dependiendo del diseño específico del sistema.

Las ventajas del NIR es que puede detectar multicapas y la composición de la estructura del contenedor además las superficies contaminadas como etiquetas no afectan la eficiencia del proceso de clasificación. (5)

Las ventajas del NIR:

- Las velocidades de escaneo permite identificación del tipo de plástico
- Permite un múltiple chequeo para asegurar mayor exactitud
- Las velocidades de escaneo permite mayor volumen de botellas plásticas separadas
- Etiquetas u otros tipos de obstrucciones no interfieren con la propia identificación de la resina
- Excepto para artículos oscuros, la lectura son independientes del color de la resina

La absorción de NIR o espectroscopía es muy rápida y conveniente para analizar polímeros ligeramente coloreados o transparentes. Espectros NIR de polímeros comunes encontrados en las corrientes residuales post-industriales y post-consumo son poco diferentes. Por esta razón la espectroscopía NIR es ideal para la identificación y separación de botellas plásticas residuales.

Permite una identificación confiable y rápida (milisegundos) y es operado de manera suficientemente robusta para operar en ambientes industriales sucios y con vibración. Sin embargo NIR, no es adecuado para el análisis de plásticos oscuros y coloreados tales como los componentes automotrices.

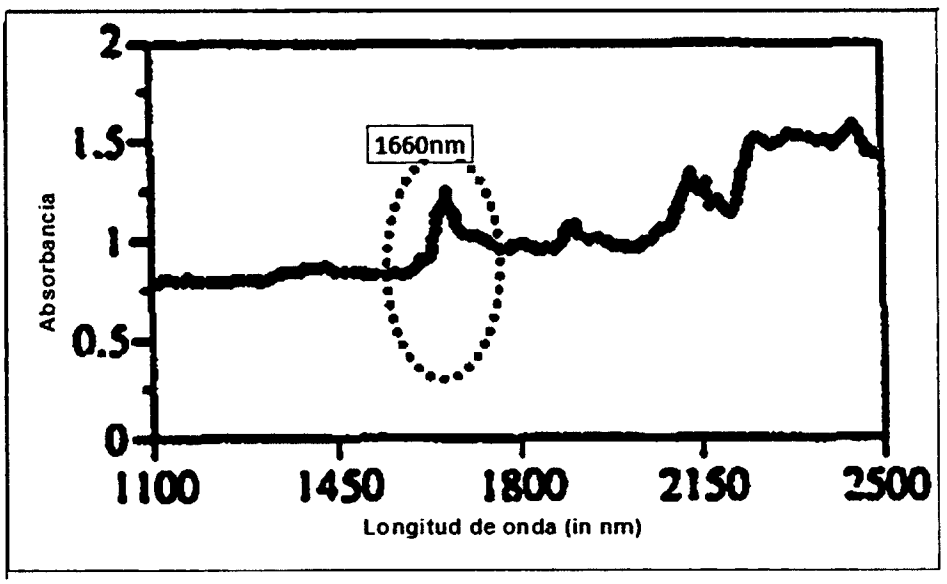

Figura 14- Espectro Característico del PET

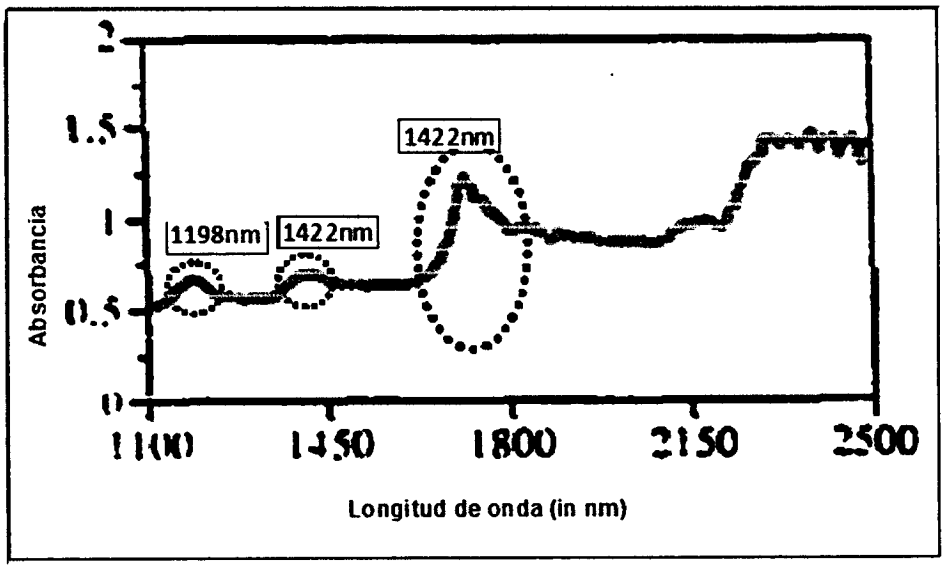

Figura 15- Espectro Característico del PVC

2.6 Separación por Disolución Selectiva

La disolución selectiva y devolatización flash es una opción de clasificación de plásticos que aún se encuentra en etapa de investigación. El proceso de separar mezcla de desechos plásticos en polímeros puros reutilizables sin técnicas de preclasificación mecánica. (1)
Como el plástico se disuelve a diferentes temperaturas, la disolución selectiva es un proceso común que involucra el lavado de los plásticos, el molido y el disolver en un solvente caliente. Al aumentar la temperatura por etapas y utilizando un controlador de temperaturas-solvente la extracción del polímero puede ser individual, además puede ser separado y luego precipitado por la adición de un no- solvente. La ventaja de la disolución selectiva es que el polímero puro puede ser recuperado sin dañar la estructura del polímero, el 2-3% de impurezas son acumuladas durante de reciclaje mecánico convencional. Si la composición de materia prima del reciclaje es conocida, por ejemplo el PET y PVC, un solo solvente logrará disolver uno de los dos materiales que puede ser usado para separar un material de otro. Además como solo es necesario limpiar antes de la disolución, la separación inicial puede ser evitada Los solventes utilizados con frecuencia son las cetonas y ácidos acéticos los cuales tienen baja toxicidad y se degradan rápidamente.

La disolución selectiva puede ser usada en el reciclaje de compuestos de fibras reforzadas, con los lavados consecutivos con solvente que permite la recuperación del material y refuerzos de la matriz.

La viabilidad económica de este proceso, puede depender de la proporción del polímero/solvente. Por ejemplo se ha encontrado que en condiciones experimentales 100g de HDPE puede disolverse en un litro de tolueno antes de que la solución se vuelva demasiado viscosa para procesar. Se afirma que los costos para una planta piloto son similares a los del reciclaje mecánico cuando se realiza con proporciones altas de polímero/solvente.

Se ha demostrado en ensayos experimentales que el uso de grandes volúmenes de disolventes no es un problema ya que estos también pueden ser reciclados, hasta un 95% (7)

Ventajas del proceso de clasificación de disolución selectiva:

- Se puede separar plásticos de mezclas completas incluyendo productos multicapa
- Los contaminates típicos como la suciedad o residuos de leche no alteran el proceso
- Pueden separar polímeros semejantes como ABS y PS o Nylon 6 y Nylon 66
- La recuperación de plásticos es química y funcionalmente equivalente a su contraparte virgen
- Se puede tratar con plásticos que están pintados y pegados (este contaminante causa mayores problemas en muchos procesos de reciclado mecánico)
- Pigmentos y rellenos pueden ser removidos por la filtración; esta es una ventaja desde el reciclado natural a un precio superior
- El proceso consolida los multiples pasos que caracteriza el proceso de reciclado mecánico dentro de un simple paso
- Requerimentos laborales son mínimos

Una mezcla de xileno y ciclohexano se utiliza como disolvente, si el PET y el PVC están presentes juntos. En esta mezcla de disolventes, PVC disuelve a una temperatura más baja que el PET. Aunque el proceso utiliza solventes, son continuamente reciclados en el proceso.

Cada uno de los polímeros se recupera de las soluciones en un 5-10% de concentración. Las soluciones se bombea a alta presión en un intercambiador de calor donde la temperatura se eleva a 250 ° - 280 ° C y son transferidas a través de una válvula en una cámara de devolatilización. Esto hace que la mayoría de los solventes se evaporen.

En este punto la solución de polímero es de aproximadamente el 85% de sólidos. Esta mezcla se bombea en una extrusora con sistema de devolatización como los utilizados para recuperar monómeros residuales y solventes de los fabricantes de polímeros. Las limitaciones evidentes de este proceso giran en torno a los factores ambientales y de seguridad de manipulación de grandes cantidades de disolventes. Además, el nivel de solvente residual en el polímero reciclado debe ser cuidadosamente controlado.

Una vez revisado los principales métodos de clasificación recomendados para separar el PVC contaminante durante el proceso de reciclado del PET

Tabla de Comparación de los Sistemas de Identificación y de Clasificación Automáticos

Método	Ventaja	Desventaja	Aplicación
Óptico	Solo efectivos para la clasificación por color	No identifica el polímero	Para remover impurezas de color y para clasificar un polímero por color
Espectroscopía Infrarroja Cercana (NIR)	Fotodetectores rápidos, tiene tiempos de respuesta cortos. Disponible para análisis de objetos ligeramente coloreados o transparentes .	No es recomendable para objetos oscuros como aquellos que contienen negro de humo que absorben y dispersan las frecuencias de NIR	Clasificación de botella. Separación de PVC y PET
Fluorecencia UV (marcadores)	Con el uso de marcadores el sistema es capaz de identificar mezclas de polímeros.	Sin marcadores no se realiza la separación. El costo de los marcadores.	Aplicación general para todos los polímeros con inclusión de marcadores.
Rayos X	Tecnología establecida para la identificación de PVC.	Se basa en un análisis elemental muchos polímeros están compuestos de el mismo elemento.	Separación de PVC y PET

3. ESTADO ACTUAL DEL ARTE

3.1 Separación por Flotación

M.T. Carvalho y colaboradores realizaron un estudio experimental para separar PVC y PS del PET con la ayuda de una mesa vibratoria húmeda, el cual es un proceso amigable con el ambiente, utilizado para separar minerales, además de requerir de bajo capital y costo operacional. Se estudiaron tanto variables operacionales del equipo como diferentes características de alimentación.

Carvalho demostró que es posible, en una operación simple y controlando la alimentación del tamaño de hojuela, obtener un concentrado puro de PET dentro de las especificaciones de la industria del reciclado, aunque con baja recuperación o un PET pre-concentrado que debe ser retratado por las especificaciones del reciclado industrial. (12)

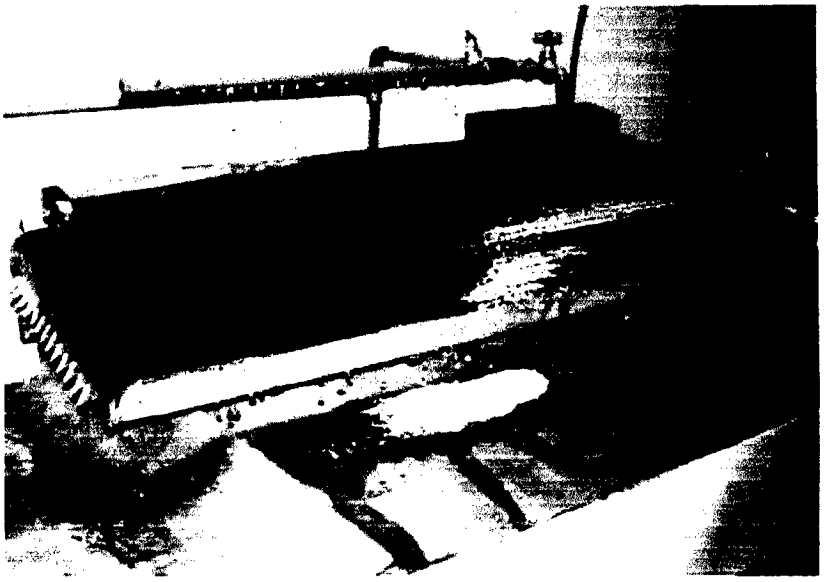

Figura 16- Mesa Vibratoria Húmeda

R.D. Pascoe investigó el potencial de separación del PVC y PET, mediante el tratamiento de flama, que es utilizado para modificar la superficie de los plásticos. Permite generar especies hidrofílicas en la superficie del plástico favoreciendo su humectación. La producción de superficies plásticas hidrofílicas es también requerida en la separación selectiva por espumado de plásticos. Para que el proceso sea selectivo, se requiere que uno de los materiales plásticos se convierta en hidrofílico mientras que el otro permanezca con un comportamiento hidrofóbico.

En el presente estudio se demostró que el método de tratamiento a la flama es muy efectivo en la producción de superficie hidrofílica en ambos plásticos, aunque los procesos no fueron selectivos bajo las condiciones investigadas. Como el punto de reblandecimiento del PVC fue significativamente más bajo que en el caso del PET, fue posible producir una diferencia significativa en hidrofobicidad, la cual fue evaluada usando la medición del ángulo de contacto. Se encontró que al ser sumergido en agua, el ángulo de contacto del PVC fue dependiente del pH. Una buena eficiencia de separación de los dos plásticos fue lograda por flotación espumado con pH de 4 a 9.

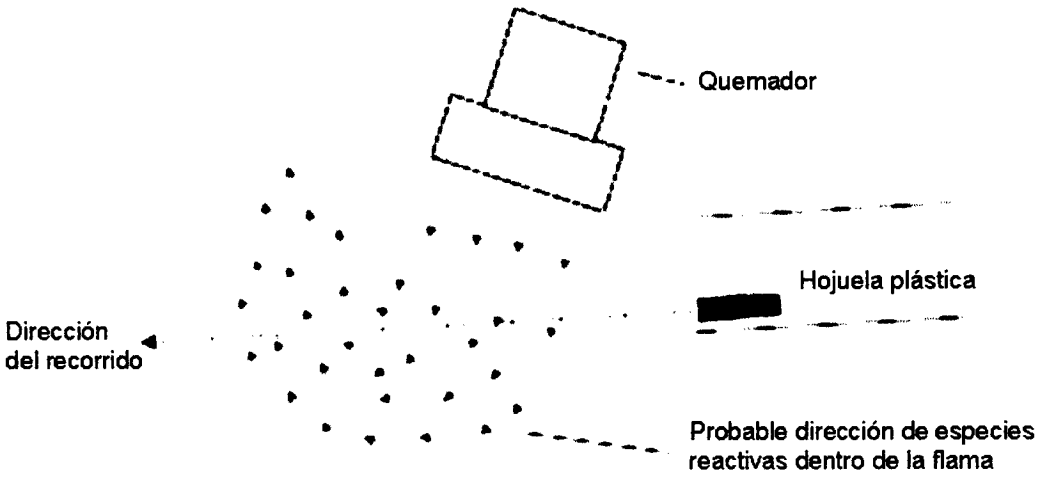

Figura 17- Sistema de Tratamiento de Flama

El aumento de la temperatura del PVC por encima de su punto de reblandecimiento (>75°C), produjo una aceleración en la recuperación hidrofóbica, mientras que el PET se vuelve hidrofílico. Se requiere de pruebas posteriores para demostrar la recuperación hidrofóbica selectiva con PET post-consumo, y como el punto de reblandecimiento se relaciona con su grado de cristalinidad. El ángulo de contacto del tratamiento de flama PVC que se ha reblandecido para restaurar su hidrofobicidad, es dependiente del pH (13)

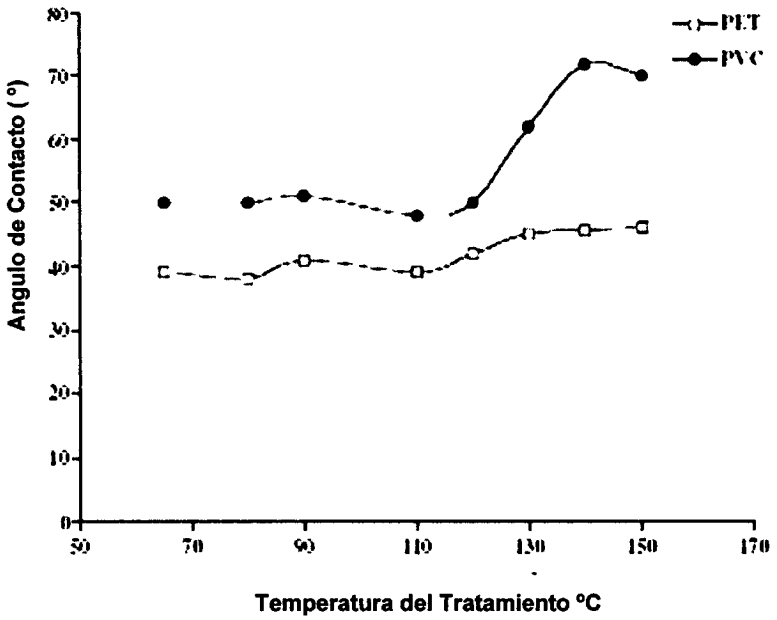

Figura 18- Medición del Ángulo de Contacto con Tratamiento a la Flama

Custodio Vásquez y sus colaboradores propusieron que la recuperación del PVC y PET se logra empleando operaciones del procesamiento de minerales como; la reducción de tamaños, separación por medios densos, y tratamiento alcalino y flotación.

Los resultados que obtuvieron a nivel laboratorio indican que se puede recuperar 95% de PVC y 97% de PET a partir de muestra seleccionada en envases de plásticos recolectados.

Por ello es posible recuperar PVC y PET a partir de los residuos plásticos; ya que mediante la separación de medios densos se puede retirar polímeros menos densos como PP y HDPE, y mediante la flotación selectiva se puede separar PVC y PET alterando las propiedades superficiales de uno de los dos.

También se demostró que con un adecuado tratamiento alcalino del porciento en peso (%w/w) de NaCl a temperaturas de 65-75°C durante 15-30 minutos y 800 RPM se modifica la hidrofobicidad del PET mientras que la hidrofobicidad del PVC permanece inalterable, facilitando así la separación selectiva, de acuerdo al esquema del proceso de la figura 19.

Con la tecnología propuesta se obtuvo una pureza de 82.96% PVC y 99.77% PET, lo que muestra que puede ser utilizado como materia prima para la fabricación de nuevos y diversos productos actualmente en desarrollo. (14)

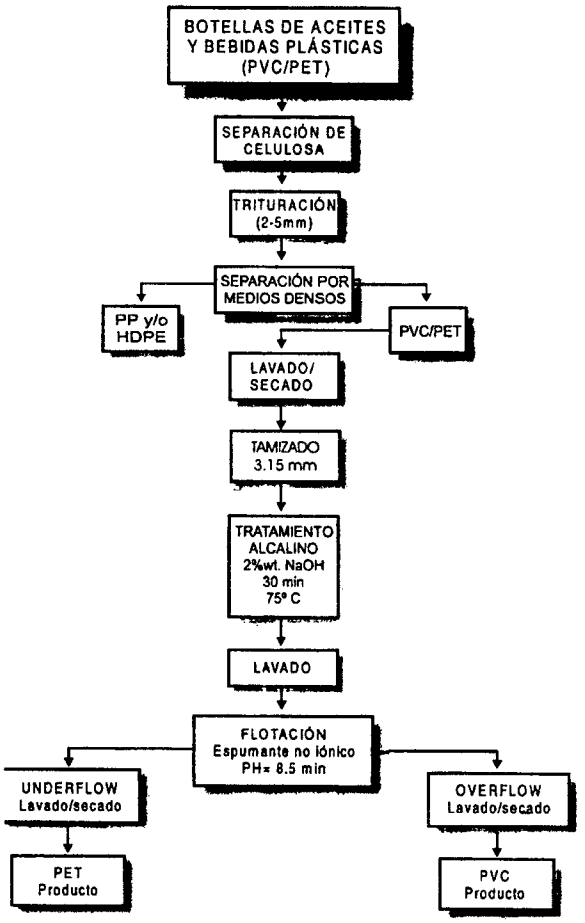

Figura 19- Proceso de Recuperación de PET y PVC

Somsak planteó que la técnica de Flotación-Espumado puede ser exitosamente aplicada para la separación del PET de una mezcla de PET y PVC mediante el uso de Polivinil Pirrolidona (PVP) como agente humectante y Metil Isobutil Carbinol (MIBC) como agente espumante Tres grupos de pseudo mezclas, fueron preparados por la mezcla de hojuelas de PET y PVC, en una relación 75:25, 50:50 y 25:75 respectivamente. Se investigaron las condiciones óptimas para la separación del PET de cada una de las pseudo mezclas.

El estudio indicó que la separación de hojuelas de plástico fue muy influenciada tanto por la concentración PVC y el número de etapas de flotación, siendo la mejor recuperación de PET obtenida fue la de relación de volumen de 25:75 usando 0.0025 mg/l PVC en la tercer etapa. (15)

Huiting Shen investigó la factibilidad de flotación de siete plásticos en presencia de un surfactante no iónico como el Alquil etoxylado. Se encontró que esta característica en todos los plásticos disminuía con la adición del surfactante: sin embargo se tiene diferente flotación y se sigue el orden de POM<PVC<PMMA<PET<PC<ABS<PS.

Para los resultados de las pruebas de separación de varias mezclas de plásticos, fue mostrado que el método de flotación Gamma (separación por flotación selectiva mediante la modificación superficial o utilizando un medio líquido con un valor específico de tensión superficial), el cual, no solo se usa para separar mezclas de diferentes plásticos con diferente densidad como la separación del POM y PVC de PC, también puede ser usado para separar mezclas de plásticos con densidad similar, como la separación del PMMA y PC.

Productos con un grado superior al 99% y la recuperación superior al 97% pueden ser obtenidos por la separación de algunas mezclas de plásticos. Los factores de superficie química como la humectabilidad de los plásticos y la tensión superficial del medio de flotación y el factor de gravedad, tales como la densidad y la forma de las partículas, fueron estudiadas.

Se encontró que el efecto de la depresión del surfactante en los plásticos se debe principalmente a la reducción de la tensión superficial del líquido, y a la selectividad de la flotación para los plásticos con idéntico tamaño de partícula, dominado por el ángulo de contacto, la forma y densidad de la partícula. Un plástico con baja densidad, mayor ángulo de contacto y poca forma tiene mayor flotabilidad. (16)

Sangobtip Pongstabodee y colaboradores realizaron una investigación con el propósito de separar los diferentes desechos plásticos de una mezcla de post-consumo, con la combinación del método de flotación de tres etapas y del método de flotación selectiva. Utilizando seis plásticos HDPE, PP, PVC, PS, PET, ABS, los cuales fueron separados en dos grupos: los de baja densidad como (HDPE y PP) y los de alta densidad (PET, PVC, PS y ABS). Los plásticos cuya densidad es menor que el medio de solución flotan mientras que los de densidad mayor se hunden.

Los resultados del experimento demostraron que la separación de HDPE de PP se logró mediante el método de flotación en tres etapas con un 50 porciento en volumen (%v/v) de alcohol etílico. Y para las mezclas de PS/ABS del PET/PVC fue de 30% v/v de cloruro de calcio. Sin embargo para la separación post-consumo de PET/PVC Y PS/ABS se utilizó la separación selectiva y se hizo hidrofílica la superficie de una de las especies, mientras que otra es hidrofóbica. En los estudios de flotación, fueron determinados los efectos del agente humectante, del agente espumante, del pH de la solución.

En la flotación selectiva al utilizar 500mg/l de lignosulfonato de calcio, 0.01ppm MIBC y 0.1mg/l$CaCl_2$ con un pH 11 se logró separar PET de PVC fueron usados como solución de flotación. Para separar el ABS del PS 200mg/l de lignosulfonato de calcio y 0.1mg/l $CaCl_2$ con un pH 7.

La humectabilidad de los plásticos incrementa cuando se agrega $CaCl_2$ y corresponde a una disminución en el ángulo de contacto y una reducción en la recuperación del producto plástico flotante. (17)

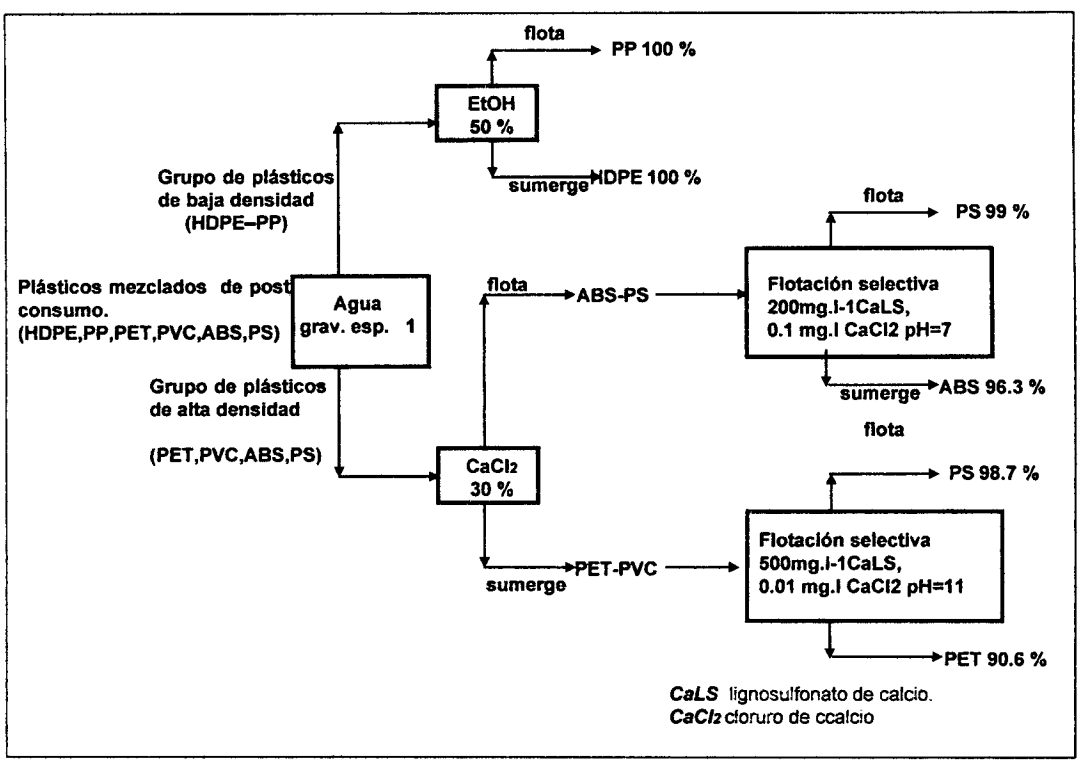

Figura 20- Diagrama de Flujo para la Recuperación de Plásticos con la Combinación de los Métodos de Flotación de tres Etapas y Flotación Selectiva

J. Drelich mediante la tecnología de flotación selectiva realiza experimentos con las condiciones apropiadas como la concentración de los reactivos, temperatura, tiempo de residencia, las cuales fueron optimizadas, mediante el análisis de las variables de la eficiencia y separación selectiva del PVC de la mezcla de PVC/PET. La tecnología envuelve el tratamiento de las partículas de PET y PVC con la solución alcalina seguida de la flotación-Espumado del PVC con surfactantes no iónicos que fueron desarrollados para pruebas a escala en laboratorio.

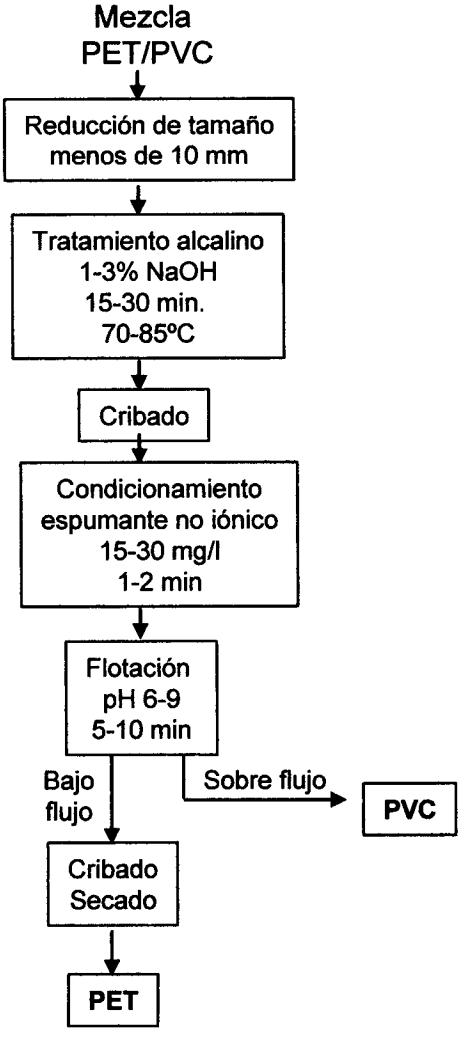

Figura 21- Diagrama de Flujo para el Proceso Flotación Espumado para la Recuperación Selectiva de PET de Mezclas PET/PVC

Los resultados demostraron que las soluciones alcalinas son buenas para destruir la hidrofobicidad del PET mientras que la hidrofobicidad del PVC muestra poco efecto. También se demostró que el uso de esta tecnología puede recuperar el 95-100% de PET y PVC de los productos procedentes de una variedad de mezclas de PVC/PET. (18)

3.2 Separación Triboeléctrica

En el presente estudio se plantearon los principios básicos de tres diferentes métodos de separación, mesa vibratoria, separación triboelétrica y la combinación de los métodos de separación por flotación y el de flotación espumado así como una guía general, para elegir el método más efectivo para la clasificación de las mezclas de plástico. Las pruebas realizadas por **Gjergj Dodbiba** y colaboradores fueron para la separación de PVC, ABS y PET de diferentes tipos de mezclas de plásticos con el fin de mejorar la calidad de la materia prima utilizada en el reciclaje mecánico.

Se encontró que la mesa vibratoria es adecuada para la recuperación efectiva de la mezcla PVC/PP recuperándose el 97% del PVC con un grado del producto del 99.51%. Así mismo los resultados demostraron que la separación triboeléctrica permite separar materiales con densidades similares, se empleó para separar la mezcla de ABS/PS. En donde se obtuvo una recuperación del 73.7%. Finalmente el 90.3% de PET fue separado de forma selectiva de la mezcla de PET/PE con combinación de la separación por flotación y la separación de flotación por espumado, el grado del producto obtenido fue de 99.7% de PET. (19)

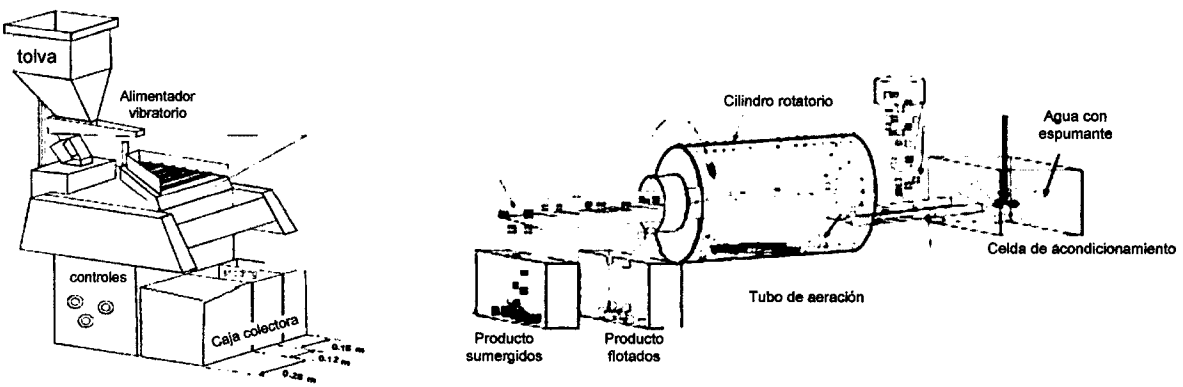

Figura 22- (a) Tabla Vibratoria;

(b) Método Combinado Separación por Flotación y Flotación-Espumado

S.J. Read utilizó la mezcla de granulado producida de botellas de PET y PVC post-consumo para separarlas mediante la tecnología de columna de flotación. La separación de un medio acuoso pH y concentración de surfactante fue optimizada con respecto a la eficiencia de separación, usando Métodos de Superficie de Respuesta (RSM). El estudio demostró que la columna de flotación puede ser usada para dar un acercamiento del 100% en la separación del PVC del PET como una simple operación. Con pH medio de valores menores de 7, el surfactante no iónico presenta eficiencias de separación más grandes, que los surfactantes aniónicos.

Con valores de pH mayores de 7, el surfactante catiónico presentó grandes eficiencias totales comparadas con los surfactantes no iónicos. Debajo del pH de 7 el pH medio juega el papel importante en determinar la eficiencia de separación lograda usando ambos surfactantes. (20)

En el presente estudio **Jae-Keun** se utilizó un sistema de separación triboeléctrica con lecho fluidizado, para la remoción de PVC de una mezcla de PVC/PET diseñado en función de velocidad del flujo de aire, resistencia del campo eléctrico, relación de mezclado de los dos componentes plásticos.

A las partículas de PVC y PET se les impartió cargas superficiales positivas y negativas, respectivamente, debido a la diferencia de los valores en función del trabajo de los plásticos suspendidos en el tribocargador de lecho fluidizado que pueden ser separados al pasar a través de un campo eléctrico externo, como se puede apreciar en la figura 23. Los resultados experimentales demuestran que la eficiencia de la separación es fuertemente dependiente del material tribocargado, la intensidad de campo eléctrico y la relación de mezcla de las partículas.

En condiciones óptimas de 150l/m de flujo de aire y 2.6kV/cm intensidad de campo eléctrico, PVC muy concentrado (99.1%) puede recubrir con más del 95% para la mezcla de materiales de PVC y PET para una etapa simple del proceso. Además los resultados muestran una recuperación de 96-99% con un contenido de extracto puro de más de 90%.

Se concluyó que el sistema de separación triboelectrostático con lecho fluidizadomostró el potencial para ser un método eficiente para la remoción de PVC en mezclas deplasticos residuales (21)

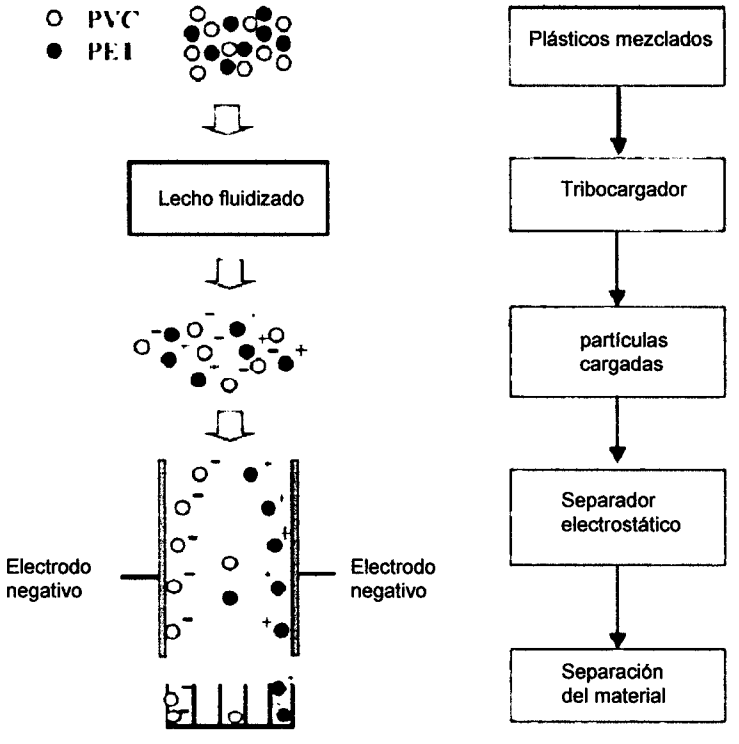

Figura 23- Diagrama del Sistema Experimental para la Separación Electrostática del PVC en Mezclas PVC/PET

Chul-Hyuun Park llevó a cabo la separación de PVC y PET con métodos triboeléctricos. El estudio de la tasa de eficiencia del PVC y PET depende de la tribocarga, la humedad relativa (inferior al 30%), la velocidad del aire (más de 10 m / s) y la mezcla de PET/PVC (PET: PVC = 1: 1). El PVC rechazado y el PET recuperado fue de 99.60 y 98.10% respectivamente.

Se realizó la separación de los tres tipos de plásticos mezclados, (PVC), (PET) y (ABS), que presentan una gama de problemas muy similares, se realizó a través de un proceso de separación de dos etapas. Se mostró para materiales como el polipropileno (PP) y el poliestireno de alto impacto (HIPS) resultaron ser separados con mayor eficiencia por el método separación triboeléctica en el caso de PVC, PET y ABS. La relación carga/masa (nC / g), de plástico aumentó con la velocidad del aire en la tribocarga.

En la primera etapa, fue separado el PP en el ciclón cargador, se observó que la separación de partículas depende de la velocidad del aire (10 m / s), la humedad relativa (<30%), el electrodo de potencial (> 20 kV), y la posición del separador (+2 cm del centro) en la unidad triboelectrostática. En la primer etapa se obtuvo PVC de grado de 99,40% y una recuperación de 98,10%. En la segunda etapa, utilizando el ciclón cargador se separó HIPS, PET grado de 97,80% y una recuperación de 95,12%, se podrían obtener en condiciones de 10 m / s, más de 25 kV, un separador central de posición, y menos del 40% de humedad relativa. Con el fin de obtener el 99,9% de grado PVC y 99,3% de grado PET, su recuperación debe ser sacrificada por el 20,9% y 27%, respectivamente, con mover el separador del centro a un (+) 6 cm de posición. (22)

3.3 Separación por Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIR)

D.M. Scott realizó una investigación para la clasificación automatizada de los desechos plásticos post-consumo. Demostrando la rápida y confiable identificación de los polímeros lograda al utilizar un espectrofotómetro infrarrojo cercano de filtro, comprobando la efectividad del método para la clasificación del PET, y PVC. El método se basa en la observación de una señal o pico en el espectro de absorción NIR para identificar el tipo de polímero como PET o PVC. Este método a sido utilizado adecuadamente para identificar el tipo de material plástico en las muestras de residuos de envases sucios y contaminandos. (23)

Ernie Becker presenta un sistema comercial (Unisort)) basado en la tecnología NIR encontrando que esta tecnología es el camino en casi todas las áreas de clasificación de los materiales reciclables. El principio básico del NIR es la medición de la reflectividad de un objeto entre un rango de longitudes de onda de 1.100 a 2.100 nm. En este rango de longitud de onda, los materiales como los plásticos, papel, y textiles tienen sus propias características específicas. El rango de estas longitudes de onda no es visible para el ojo humano.

Este moderno sistema de clasificación puede distinguir plásticos como PP, PS, PET, PC o PVC con facilidad, así como identificar claramente los materiales a base de celulosa, como papel, cartulina, cartón o madera y fibras naturales. Las combinaciones de estos materiales como el Tetra-Pak o contenedores similares también pueden ser clasificadas. Los materiales que no pueden ser identificados, debido a la falta de longitudes de onda características son la piedra, porcelana o materiales obscuros, los cuales no reflejan y que además no son medidos. (24)

Norbert Eisenreich y colaboradores, buscaron reciclar plásticos económicamente, así como lograr que varios tipos de polímeros fueran separados en corto tiempo. El rango del espectro de NIR les permitió monitorear las propiedades estructurales o moleculares del plástico bajo investigación. El sistema presentó un espectrómetro basado en fibra óptica para mediciones de la absorción y la reflexión, un filtro ajustable óptico-acústico (AOTF), Siendo capaz de detectar 1,000 espectros/s e identificar 20 piezas/s. El presente espectrofótometro (AOTF) es capaz de identificar la mayor parte de los materiales plásticos en muy corto tiempo (25)

3.4 Separación por Rayos X

Brian L. Riise and Michael B. Biddle aplicaron fluorescencia de Rayos X para el análisis de plásticos encontrados en el reciclaje de bienes duraderos. Demostrando que el RXF puede detectar Cl, Br, Sb, Ti y otros elementos que se encuentran en los plásticos. Observaron que RXF tiene muchas características positivas como su relativa facilidad de uso, la rápida preparación de la muestra, un amplio rango de elementos detectables y un amplio rango de concentración para el análisis.

De esta manera RXF es una herramienta para detectar la presencia de la mayoría de los elementos más pesados que el Magnesio. Ya que la técnica permite un análisis relativamente rápido tanto cualitativo como cuantitativo de ciertos elementos que se encuentran comúnmente en plásticos reciclados, demostrando que con el uso de RXF se encuentra el Cl del PVC, y los retardante de flama (Br, Sb etc.,).

Esperando que con esta investigación la mayoría de los recicladores de plásticos así como los compradores de plásticos reciclados se beneficien al tener acceso al análisis por medio del método de RXF. (26)

En estudios complementarios se demuestra que la mayor ventaja de la técnica de rayos X de transmisión RXT se debe a que es insensible a la contaminación de la superficie de cualquier material ya sea suciedad, así como etiquetas de las botellas.

El NIR solo penetra en lo que respecta a varias micras en la superficie. Otra ventaja es que la detección, se lleva a cabo aunque el material se encuentre apilado por ello no se tendrán problemas en identificar botellas de PVC, que puedan encontrarse debajo de las botellas de PET, este método también es capaz de separar los metales y piedras del PET. (27)

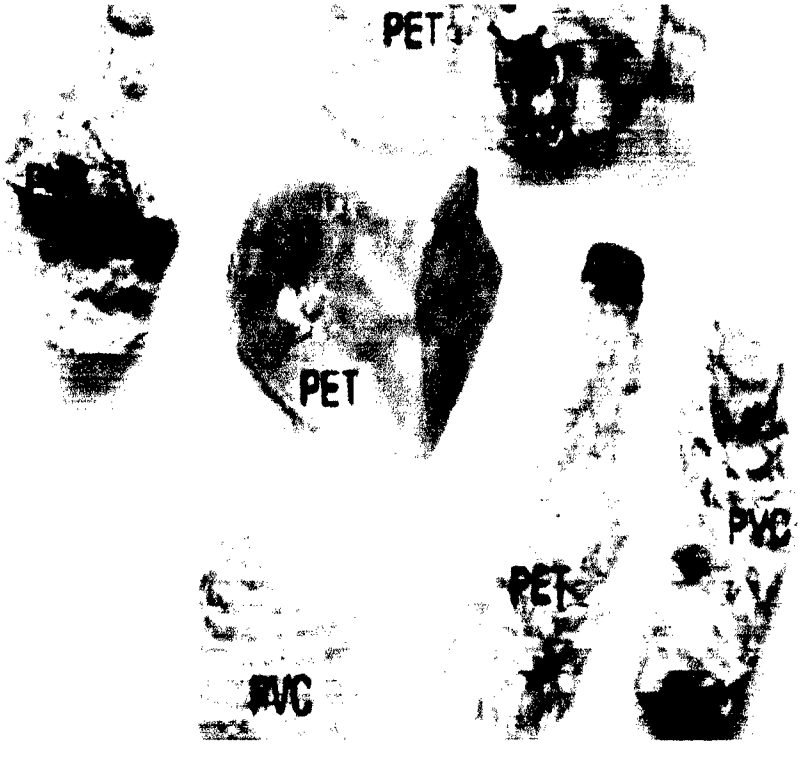

Figura 24- Imágenes de Transmisión Óptica de Envases de PET y PVC

4. CONCLUSIONES

En la investigación realizada se logró conocer los diversos métodos de clasificación de reciclado de plásticos, además de tener en cuenta la importancia de los materiales plásticos reciclados, tanto económica como ambientalmente.

Existen diferentes polímeros los cuales forman parte de los desechos plásticos, algunos son fáciles de identificar, sin embargo existen otros que son muy similares entre sí, por ello es difícil su identificación.

Analizando los métodos de separación se logró identificar los métodos más eficientes para recuperar el PET a partir de desechos plásticos, concluyendo que todos los métodos mencionados son adecuados para la clasificación, no obstante cada uno presenta ciertos detalles que van disminuyendo la calidad de la separación.

La clasificación automatizada es uno de los mejores métodos de separación, que emplean algún tipo de detección ó señal que diferencía las botellas de plástico. La espectroscopia infrarroja cercana (NIR) demuestra ser una de las mejores técnicas de separación, de resinas de plásticas.

El método de Rayos-X resultó ser muy eficiente para identificar el PVC, debido a que detecta la presencia del átomo de cloro, aunque tiene sus deficiencias..

Estos son los mejores métodos de clasificación, sin embargo tienen la desventaja de presentar un costo elevado, incrementando el costo del proceso.

La separación y clasificación de los materiales plásticos tiene un papel importante en el reciclado de los diversos materiales residuales. Diversas técnicas potenciales son disponibles, desde sencillas como lo son la separación manual, hasta sofisticados como los separadores automáticos.

*Los métodos de espectroscopía infrarroja cercana son los más utilizados para la clasificación automatizada de plásticos.

5. APENDICE

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
Br	Bromo
Cl	Cloro
CO_2	Dióxido de Carbono
HDPE	Polietileno de alta densidad
HIPS	Poliestireno de alto impacto
LDPE	Polietileno de baja densidad
MIBL	Metil Isobutil Carbinol
NaCl	Cloruro de Sodio
Ny	Nylon
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Polietilentereftalato
PETE	Polietilentereftalato
PMMA	Polimetimetacrilato
POM	Polioximetileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo
PVP	Polivinilpirrolidona
Sb	Antimonio

6. BIBLIOGRAFIA

1. **Bruno, Edward A.** *Automated Sorting of Plastics for Recycling.*

2. **Goodship, Vannessa.** *Introduction to Plastics Recycling.* Second Edition. s.l. : Smithers Rapra, 2007. págs. 41-59. 978-1-84735-078-7.

3. **Ted Siegler, Ron Perkins.** *Sorting Plastic Bottles for Recycling.* 1999.

4. *Use of Electrostatic Techniques to Identify, Sort and Recycle Mixted Industrial & Municipal Waste.* England : Wolfson Electrostatics, 2002.

5. **D.A. Wahab, A. Hussain, E. Scavino, M.M. Mustafa and H. Basri.** *Development of a Prototipe Automated Sorting System for Plastic Recycling.* Malaysia : American Journal of Applied Science, 2006.

6. **P.Mapleston.** *Modern Plastics.* 1992.

7. **Lars Lundquist, Manson J.A.E., Yves Leterrier, Paul Sunderland.** *Life Cycle Engineering of Plastics: Technology, Economy, and Enviroment.* s.l. : Elsevier Science & Technology Books, 2001. 0080438865.

8. **Ahmad, S.Rafi.** *Marking of Products with Fluorescent Trecers in Binary Combinations for Automatic Identification & Sorting.* s.l. : Assembly Automation, 2000. págs. 58-65. Vol. 20.

9. *Marker System.*

10. *Automated Sorting System.* 1997.

11. **Deteien, E. Sereni.** *Recycling of Plastic Materials.* [ed.] Francesco Paolo La Mantia. Canada : Chem Tec Publishing, 1993. págs. 99-110, 123-137. 1-895198-03-8.

12. **M.T. Carvalho, E. Agente, F. Durao.** *Recovery of PET from packaging plastics mixtures by wet shaking table.* Lisbon, Portugal : 2006. págs. 1747-1754.

13. **R.D. Pascoe, B. O'Connell.** *Flame treatment for the selective wetting and separtion of PVC and PET.* 2002. págs. 845-850.

14. **Custodio Vasquez, Walter Pardavé, Ella Moreno y Leonor Duarte.** *Aplicación de Operaciones del Procesamiento de Minerales a la Recuperación de PVC y PET a partir de Residuos Plásticos.* Bucaramanga, Colombia : págs. 59-63.

15. **Saisinchai, Somsak.** *Separation of PET from PET & PVC Mixture by Froth Flotation Technique.* Bangkok, Thailand : Journal of Metals, Materials and Minerals, 2004. págs. 79-85. Vol. 13.

16. **Huiting Shen, R.J. Pugh, E. Forssberg.** *Flotability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant.* stockholm, Sweden : Elsevier Science, 2002. págs. 63-70.

17. **Sangobtip Pongstabodee, Napatr Kunachitpimol, Somsak Damronglerd.** *Combination of three-stage sink-float method and selective flotation technique for separation of mixed post-consumer plastic waste.* Bangkok Thailand : ScienceDirect, 2007.

18. **J. Drelich, T.Payne, J.H. Kim, and J.D. Miller.** *Selective Froth Flotation of PVC From PVC/PET Mixtures for the Plastics Recycling Industry.* Salt Lake City, Utah : 1998. Vol. 38.

19. **Gjergj Dodbiba, Jun Sadaki, Atsushi Shibayama, Toyohisa Fujita.** *Sorting Techniques for Plastics Recycling.* Japon : 2006. págs. 187-190. Vol. 6.

20. **S.J. Read, G.C. Lees and S.J. Hurst.** *Separation of PET from PVC using Column Flotation.* Manchester : 1999. Vol. 4.

21. **Shin, Jae-Keun Lee and Jin-Hyouk.** *Desing & Performance Evaluation of Triboelectrostatic Saparation System for the Separation of PVC & PET Materials using a Fluidized Bed Tribocharger.* Korea : 2002.

22. **Chul-Hyun.** *Application of electrostatic separation to recycling of plastic waste: separation of PVC,PET an dABS.* Korea : 2007.

23. **Scott, D.M.** *A Two-Colour Near-Infrared Sensor for Sorting Recycled Plastic Waste.* Wilmington, USA : Sci. Technol., 1995. págs. 156-159. Vol. 6.

24. **Beker, Ernie.** *Automating Sorting of Recyclable Materials with NIR Technology.* Hamilton, New Zealand : 2007.

25. **Norbert Eisenreich, Jurgen Herz.** *Fast On-Line Identification of Plastics by Near-Infrared Spectroscopy for use in Recycling Processes.* 1996.

26. **Biddle, Brian L. Riise and Michael B.** *X-Ray Fluorescence Spectroscopy in Plastics Recycling.* Richmond, CA, USA : American Plastics Council, 1999.

27. *X-Ray Separation of Pet Bottles.*