

62,
2 y
7

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA RECUPERACION Y RECICLAJE DE BOTELLAS DE PVC

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

TONATIUH GUSTAVO GARCIA SPARZA GUADARRAMA

SERGIO ALFREDO LOPEZ VIVES

Asesor de Tesis: M. en C. Amando Padilla Ramírez

MEXICO, D. F.

1991

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA RECUPERACION Y RECICLAJE DE BOTELLAS DE PVC

CONTENIDO

1 OBJETIVOS Y ANTECEDENTES	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 EL PROBLEMA DE LA BASURA	2
1.2.1 La basura, antes y ahora	2
1.2.2 Producción de basura en el mundo y en México	3
1.3 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS DESECHOS PLASTICOS	6
1.3.1 Obtención de materia prima	8
1.3.2 Procesamiento	9
1.3.3 Aplicaciones y usos	9
1.3.4 Deposición	9
1.4 CLASIFICACION DE LOS DESECHOS PLASTICOS	10
1.5 FACTIBILIDAD DE RECUPERACION Y RECICLAJE DE LOS DESECHOS PLASTICOS	11
1.5.1 Tipos de reciclado	11
1.5.2 Posibilidades economicas del reciclado	11
1.5.3 posibilidades técnicas del reciclado	13
1.5.4 Reciclado a nivel internacional	14
1.6 PRODUCCION Y CONSUMO DE PVC EN MEXICO Y EN EL MUNDO	16
1.6.1 Abastecimiento de materia prima	16
1.6.2 Capacidad instalada	16
1.6.3 Producción y consumo	17
1.6.4 Distribución por segmento	18
1.6.5 Panorama del PVC en el mercado internacional	20
1.6.6 Proyección de la demanda en el mercado nacional	20
1.7 JUSTIFICACION DEL RECICLAJE DE BOTELLAS DE PVC	21
1.7.1 Peligro en la incineración del PVC	21
1.7.2 Perspectivas para el reciclaje de PVC	22

2 DISEÑO DEL PROCESO	25
2.1 VERIFICACION DE LA DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA	25
2.2 ANALISIS DE LAS CONDICIONES DEL PROBLEMA	26
2.3 ANALISIS Y SELECCION DE ALTERNATIVAS	27
2.3.1 Sistema de recolección	27
2.3.2 Sistema de transporte	28
2.3.3 Separación, verificación del tipo de plástico del envase y sistema de selección	29
2.3.4 Sistema de limpieza	32
3 FUNDAMENTOS TEORICOS	35
3.1 DETERGENCIA	35
3.2 DESCRIPCION DE LAS VARIABLES FISICOQUIMICAS Y MECANICAS INVOLUCRADAS	37
3.3 EQUIPOS DE AGITACION	39
3.3.1 Agitadores	39
3.3.2 Análisis teórico del consumo de potencia en equipos de agitación	40
4 DISEÑO EXPERIMENTAL	41
4.1 ANALISIS EXPERIMENTAL MODIFICANDO LAS VARIABLES INMERSAS EN LA DETERGENCIA	41
4.1.1 Experimentación en el laboratorio	41
4.1.2 Experimentación en planta piloto	43
4.2 METODOS PARA PREPARACION DE MUESTRAS	44
4.2.1 Separación de muestras	44
4.2.2 Preparación de muestras	45
4.3 METODOS DE ENSAYO PARA EVALUACION DE PROPIEDADES	45

5 RESULTADOS Y DISCUSION	47
5.1 ANALISIS EXPERIMENTAL MODIFICANDO LAS VARIABLES INMERSAS EN LA DETERGENCIA	47
5.1.1 Experimentación en el laboratorio	47
5.1.2 Experimentación en planta piloto	51
5.2 EFECTO DEL TIPO DE MUESTRA EN LA APARIENCIA FISICA DEL PRODUCTO RECICLADO	55
5.3 EFECTO DEL TIPO DE MUESTRA EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PRODUCTO RECICLADO	57
6 APLICACION DE LOS DIFERENTES MATERIALES RECICLADOS	60
6.1 LIMITANTES DEL REPROCESADO DEL PVC	60
6.2 POSIBILIDADES DEL PVC RECICLADO	61
7 PROPUESTA DE UN PROCESO A NIVEL INDUSTRIAL	63
7.1 DESCRIPCION DEL PROCESO	63
8 CONCLUSIONES	66
9 BIBLIOGRAFIA	68
10 APENDICES	70

1 OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

1.1 OBJETIVOS

Este trabajo, comprende fundamentalmente dos partes:

La primera, enfocada al estudio y recopilación bibliográfica sobre la generación de basura a nivel mundial y en México, así como los problemas inherentes a la misma y los métodos o procesos que se han desarrollado y aplicado para la solución del manejo de la basura. En particular, este estudio bibliográfico, se realiza sobre los desperdicios plásticos, su manejo, recuperación y posibles aplicaciones.

La segunda parte, se enfoca al desarrollo de un proceso que permita la recuperación y reutilización del PVC a partir de desechos urbanos (procedentes de tiraderos), particularmente reciclando los envases de PVC los cuales son relativamente fáciles de identificar.

Dentro de los objetivos del proyecto está definir la factibilidad técnica y económica del proceso. Esto involucra definir métodos adecuados para la recolección, transporte, selección, limpieza y reprocesado del PVC. Indudablemente algunos de estos métodos deberán adecuarse a las condiciones reales que prevalecen fundamentalmente en los tiraderos.

1.2 EL PROBLEMA DE LA BASURA

1.2.1 La basura, antes y ahora

Originalmente, la basura no era un problema para las tribus nómadas, debido a su constante movimiento sobre las diferentes regiones, dejando la basura en lugar anterior de residencia. Cerca del año 10,000 a.C., la gente empezaba a establecerse en un solo lugar, teniendo que vivir con su basura, o mover ésta a cualquier otro lado. La interrogante surgió: ¿Que hacer con la basura?

Durante la edad media, los depósitos de basura eran responsabilidad de cada individuo. Mucha gente simplemente dejaba su basura fuera de su puerta o ventana. Cerdos deambulaban por las calles deglutiendo todo lo digerible. Se percibían malos olores provocando enfermedades, debido a esto se realizaron los primeros esfuerzos para llevar los desechos fuera, normalmente a los límites de la ciudad.

La sobrepoblación en las ciudades y los desperdicios generados por las plantas manufactureras durante la revolución industrial, hicieron de esto un problema insufrible.

Compañías escabadoras privadas y organizaciones municipales empezaron a trabajar conjuntamente a finales del siglo XVII para limpiar las calles y recolectar desechos con bases reglamentadas.

Durante los primeros años de este siglo, las ciudades eran generadoras de diversos tipos de desechos. En 1916 las grandes ciudades mostraban un promedio per cápita de generación de basura de alrededor de una y media a tres cuartos de tonelada al año, donde aproximadamente el 80% consistía en cenizas de carbón y madera provenientes de la estufas.

En los años veinte de este siglo, se empezó el desarrollo de tecnologías para ahorrar dinero reduciendo la cantidad de basura a tirarse, por ejemplo: incineradores de desperdicios y plantas reductoras de basura para fundir los desperdicios obteniéndose grasas y aceites para hacer jabones, velas y perfumes.

En algunas partes hubo manifestaciones de inconformidad con las repercusiones ambientales de las plantas reductoras de desperdicios, ya que ninguna de las tecnologías era capaz por sí misma de solventar el problema eficientemente, y algunas de estas plantas finalmente desaparecieron.

El ser humano genera cada vez mayor cantidad de desperdicios y el sector industrial ha lidiado con gran cantidad de éstos. Debido a esto, nuestras cargas de desperdicios han ido aumentando hasta reflejar altos niveles de acumulación de basura, compuesta por papel, plástico, sintéticos, empaques y productos manufacturados. En Estados Unidos, entre 1958 y 1978, el uso de empaques se incremento un 63% hasta alcanzar un valor medio de 300 kg por persona al año [1].

1.2.2 Producción de basura en el mundo y en México

En el mundo en 1990 se produjo un total de 775 millones de toneladas, siendo los países más industrializados y las ciudades de mayor explosión demográfica los mayores generadores de basura. La generación de basura per cápita varía desde 0.5 kg en los países menos desarrollados hasta 2 kg en los países altamente industrializados [2]. En la Figura 1.1 se muestra una gráfica de producción de basura en diferentes países en el año de 1990, así como el porcentaje correspondiente a desechos plásticos en la basura.

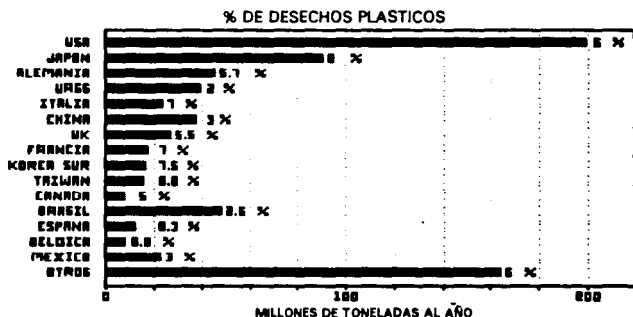


Figura 1.1. Generación de basura en el mundo en 1990.

De igual forma como varía la generación per cápita de basura, también varía su composición en función de la ubicación geográfica de la población generadora, estrato social, costumbres etc. Así, el porcentaje de generación de basura plástica varía de país a país tal y como se muestra en la Figura 1.2.

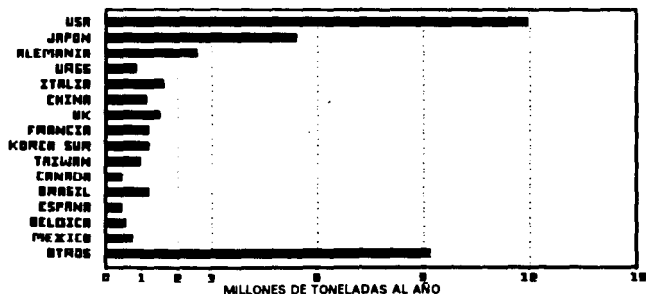


Figura 1.2. Generación de desechos plásticos en el mundo en 1990.

En México como en todo el mundo todos los días se producen una gran cantidad de desperdicios, trayendo consigo impactos negativos en los sistemas ecológicos, así como la escasez de recursos renovables y no renovables, ya que muchos satisfactores producidos se usan momentáneamente para después pasar a formar parte de la gran cantidad de basura existente. Las estadísticas respecto a la generación de basura señalan un crecimiento porcentual anual estimando que para el año 2000 ésta será de 36.3 millones de toneladas [2]. Actualmente la generación de basura por día en México es de 60,000 toneladas, siendo el Distrito Federal la entidad con mayor generación de basura, seguida del Estado de México y el de Jalisco, con una generación de 11,600, 10,000 y 5,300 toneladas/día respectivamente. Las Figuras 1.3 y 1.4 muestran los datos estadísticos de la generación de basura en el país desde el año 1982 hasta la perspectiva de generación en el año 2000 y la generación diaria de basura en 1990 por estado, respectivamente.

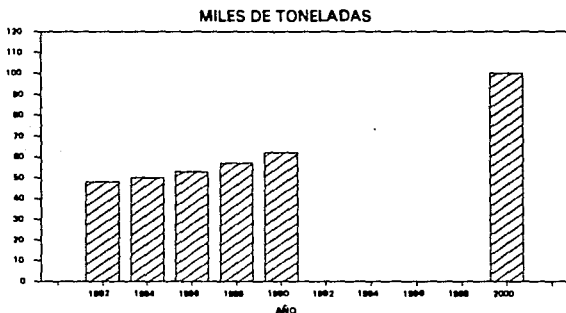


Figura 1.3. Generación de basura por día en México.

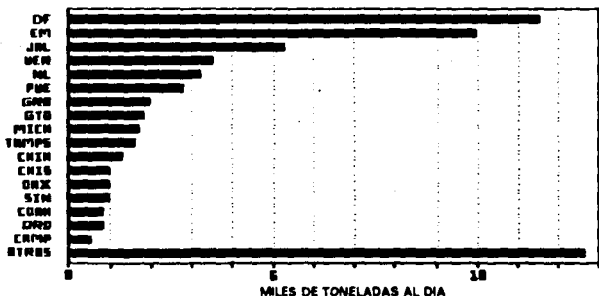


Figura 1.4. Generación diaria de basura en México por estado en 1990.

Las causas de la desmedida generación y acumulación de basura son varias tales como: falta de cultura en la población, malos hábitos, desidia, mala organización gubernamental, irresponsabilidad de los diferentes sectores sociales, etc. Por lo cual la basura, su manejo y deposición constituyen problemas de grandes dimensiones en México y a nivel mundial.

La basura no es nada más un problema de promoción de contaminación y enfermedades diversas. También es una carga para toda la sociedad por el costo que representa.

Generación de desechos sólidos en la Ciudad de México.

En 1971, la Cd. de México se dividió en 7 sectores de limpia; sin embargo, al año siguiente las delegaciones del Distrito Federal tomaron a su cargo este servicio, en sus jurisdicciones correspondientes, aumentando a 30 los sectores de limpia.

El centralismo de la administración pública, la desmedida expansión de la ciudad, el crecimiento de la población y una mala planeación hacen que el actual sistema de recolección, deposición y reciclaje de residuos sólidos, no sea el más adecuado para nuestra metrópolis.

La basura como desecho de la sociedad aparece sin valor comercial en el ciclo de la circulación de mercancía; sin embargo, al ser beneficiada por el trabajo de los pepenadores adquiere un valor monetario, es entonces, cuando la basura en un determinado porcentaje, deja de ser un desecho para convertirse en materia prima de numerosos procesos industriales.

Hablar de volúmenes de basura en la Cd. de México, es hablar de su población, del ritmo de crecimiento de la misma y de sus crecientes necesidades de consumo. Si consideramos el área metropolitana y una población de 20 millones, el volumen generado es cercano a 20,000 toneladas al día.

En números relativos, el incremento porcentual de basura, ha sido, en promedio, del 30% anual durante los últimos cinco años.

Los subproductos predominantes, en los sitios de deposición final en la Cd. de México son: desechos orgánicos, papel, cartón, vidrio, metales y plásticos entre otros, cuyos porcentajes se muestran en la Figura 1.5.

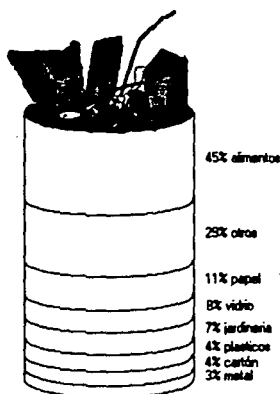


Figura 1.5. Composición de la basura en la ciudad de México.

Lugares de Deposición de Desechos Sólidos en la Cd. de México

Desde hace mucho tiempo en diversos rumbos de la ciudad, han sido establecidos lugares para la deposición de residuos sólidos (Santa Fe-Prados de la Montaña, San Lorenzo Tezonco, Santa Cruz Meyehualco, Santa Catarina, Bordo Poniente, Bordo Xochiaca, Tláhuac, Tlalpan, etc.). Algunos pequeños clandestinos, y otros grandes tiraderos oficiales de desechos urbanos, que carecen de instalaciones adecuadas y en los cuales los residuos sólidos, en la mayoría de los casos, después de la pepena son cubiertos por tierra. La gradual transformación de tiraderos de cielo abierto a relleno sanitario reviste connotaciones técnicas y sociales: implica la selección de sitios para su localización, problemas de territorialidad entre el D.F. y el Edo. de México, reubicación de pepenadores, etc.[3].

1.3 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS

La preocupación por la protección del ambiente constituye una de las principales inquietudes de la sociedad contemporánea. Problemas de carácter estructural, como la crisis energética, han venido a tomar mayor fuerza que la contaminación, aunque para algunos sectores de la población, tales como los grupos ecologistas, siguen primando las inquietudes ambientales y ecológicas [4].

Vivimos en una sociedad de consumo que, junto con la mayor revolución tecnológica, ha dado lugar a la más grande producción de residuos de toda la historia de la humanidad. Los nuevos modelos de desarrollo deberán basarse en tecnologías de producción sin desechos, o con pocos residuos. Esto permitiría resolver el problema de contaminación. Lógicamente, la política de desarrollo basada en estas tecnologías debe ir acompañada de una política de recuperación de residuos que inevitablemente surgen de toda actividad humana.

A pesar de los esfuerzos para mejorar el medio es necesario educar a la población de que cada uno de los procesos y actividades que se realizan tienen efectos que repercutan en mayor o menor grado en eventos como contaminación del aire, la generación de lluvia y niebla ácidas, causadas por el consumo de energéticos; y la contaminación de la tierra y el agua debidos fundamentalmente a la deposición de desechos peligrosos.

Las actividades tecnológicas involucradas en el ciclo de vida de cualquier producto, se inicia desde la extracción de la materia prima, la cual forma parte del medio natural, pasando por un sinnúmero de eventos tales como procesamiento, almacenaje, transporte, manejo y uso, para finalmente regresar al ambiente como desperdicio.

Como resultado de los diferentes pasos de la cadena producción-consumo, el medio sufre impactos adversos, por esto en la introducción de nuevos productos químicos, adopción de nuevas tecnologías y cambios en la utilización de las materias primas deben analizarse desde el punto de vista ecológico, los posibles efectos físicos, químicos y biológicos del ecosistema.

En síntesis estos problemas son realmente complejos y demandan una amplia participación de todos los sectores que conforman a la sociedad para solucionarlos, fundamentalmente debe tenderse a reducir el consumo de energéticos y el tratamiento y minimización de desechos.

El constante aumento de residuos exige una política de gestión tanto a nivel industrial como urbano. Las dificultades son grandes, ya que en muchos casos no es posible definir el concepto de residuo. Este concepto surge del mundo de la economía, del valor que se le asigna y de las posibilidades de utilización conforme a los conocimientos científicos y técnicos del momento. así, lo que hoy es residuo, mañana puede ser materia prima si adquiere un valor en el mercado.

Las razones ecológicas, constituyen una motivación suficiente para la recolección o destrucción de los desechos. Ahora bien, el aumento del costo de las materias primas, de la energía, de su escasez, y del deber moral del hombre para utilizar los recursos de que dispone en forma planificada y sostenida, pensando en las generaciones futuras, son motivaciones de mayor fuerza que obligan, no solo a no contaminar, sino a recuperar, reciclar o reutilizar de alguna forma todo tipo de residuo.

En las últimas décadas, la producción y consumo de productos manufacturados en plástico, se ha incrementado en demasía, debido a la gran disponibilidad de materias primas, a los bajos costos de obtención y procesamiento, a la amplia existencia de tecnologías de procesamiento, a su gran funcionalidad y propiedades y a la posibilidad real de sustituir en muchas aplicaciones a materiales convencionales como metales, vidrio, madera, fibras naturales, etc. La crisis del petróleo que indujo a pensar en un

retramiento del desarrollo de la industria del plástico, fué, por el contrario el catalizador que aceleró la aplicación de estos materiales en los diferentes campos industriales. En general los plásticos requieren de un consumo energético 50% menor en su elaboración comparado con otros materiales como: vidrio, metales, etc.[4], como se muestra en la Figura 1.6. Aunado a esto los plásticos proporcionan una serie de ventajas adicionales como son: un bajo peso específico, alta resistencia a la corrosión, bajos coeficientes de fricción, etc.

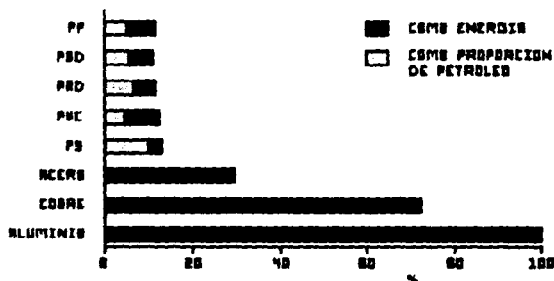


Figura 1.6. Comparación de requerimientos de energía para la Elaboración de 100 cm^3 de diferentes materiales.

De aquí la importancia de realizar el análisis de los efectos en el ambiente de las diversas etapas de la cadena producción- consumo incluyendo la deposición de los mismos.

La utilización de materiales poliméricos en la vida diaria repercute en los sistemas biológicos de manera directa, presentando un gran número de aspectos interconectados entre sí, siendo algunos de estos benéficos y otros perjudiciales.

1.3.1 Obtención de materia prima

El proceso de obtención de los monómeros, en su mayoría derivados del petróleo, se considera una industria de bajo consumo energético, se estima que solo el 2% del petróleo es utilizado en la obtención de monómeros [5]. Sin embargo, en esta etapa, no existen estudios que permitan evaluar el efecto que tiene la extracción de la materia prima en el ambiente, por la generación de sustancias volátiles que no son controladas durante el proceso.

1.3.2 Procesamiento

Durante el procesamiento y transformación de materiales poliméricos, se puede señalar que el consumo de energía requerido en la elaboración de diversos productos es de un 30 a un 50% menor que el requerido al procesar otros materiales. Esto señala que la utilización de los plásticos favorece la disminución del consumo de energía y por lo tanto la reducción de contaminantes.

En lo referente a la generación de desperdicios durante el procesamiento, éstos son mínimos, debido a las altas eficiencias de las nuevas tecnologías utilizadas en la industria de la polimerización, reduciendo el desperdicio al 1%. Dentro de la industria de la transformación se han desarrollado métodos de reciclaje de los desperdicios generados, reduciéndolos casi por completo [6].

1.3.3 Aplicaciones y usos

Desde este punto de vista, debe mencionarse el hecho de que los plásticos, en particular los llamados plásticos de ingeniería, materiales compuestos de avanzada y aleaciones plásticas, en las últimas décadas han penetrado fuertemente en las industrias del transporte y aeronáutica por las altas relaciones costo/propiedad que exhiben.

El uso de estos materiales plásticos ha reducido no sólo los costos y consumo de energía en su fabricación, sino que también reducido los costos de operación de los vehículos con ellos construidos, debido a una sustancial disminución del peso de los mismos. Por ejemplo, la utilización de materiales compuestos grafito/resinas epóxicas en algunos de los elementos estructurales de los Boeing 757 y 767 reducen los costos de producción en un 30% , pero lo más importante es que la reducción de peso disminuye en un 2% el consumo de combustible, ahorrándose 100,000 galones del mismo por año y por avión. En general se estima que por cada 1% de reducción de peso en los vehículos, se reduce en 0.5% el consumo de energía.

Bajo este esquema, la industria automotriz ha incrementado el consumo de materiales plásticos en los componentes automotrices, esperándose que para 1990 representen el 11% aproximadamente del peso total del vehículo [6], lo cual incrementará la eficiencia del combustible y consecuentemente la reducción de contaminantes.

1.3.4 Deposición

El impacto ecológico, por la deposición de los desperdicios plásticos es un problema de grandes dimensiones por el alto consumo y producción de éstos en la actualidad.

Se estima que la contribución de los plásticos a la basura es del orden de un 4 a un 8% en peso, dependiendo del grado de industrialización del país, alrededor del 4% [3] en los países en vías de desarrollo como es el caso de México, lo cual representa aproximadamente entre un 30 y 40% en volumen. Debido a su baja densidad los plásticos son más visibles en los tiraderos de basura.

El porcentaje de materiales de empaque en la basura es inversamente proporcional a los desechos de alimentos, lo cual está asociado con el estándar de vida y el sistema de distribución de alimentos [7].

Como se puede ver en la Tabla 1.1 los plásticos utilizados para empaque son desechados en su totalidad en un periodo no mayor a un año, mientras que artículos con vida útil mayor no son tan frecuentes en los tiraderos de basura.

Tabla 1.1. Vida aproximada de diferentes productos manufacturados en plástico y porcentaje de desechos de los mismos al año [7].

APLICACION	VIDA APROXIMADA (años)	DESECHOS %
EMPAQUE	1	100
TRANSPORTE	5	20
MUEBLES Y UTENCILIOS DEL HOGAR	10	10
ELECTRICO Y ELECTRONICA	10	10
CONSTRUCCION	50	2
OTROS	50	2

Es el consumidor, el principal generador de los desechos plásticos que llegan a los tiraderos de basura, siendo dichos desechos sumamente heterogéneos y altamente contaminantes.

1.4 CLASIFICACION DE LOS DESECHOS PLASTICOS

Los desechos plásticos se podrían clasificar desde varios puntos de vista, tales como: tipo de productos (películas, envases, etc.), tipo de polímero (PE, PP, PVC, etc.) o bien de las fuentes de las que provienen, etc.

Independientemente del tipo de clasificación, los materiales plásticos más abundantes son los principales termoplásticos: polietileno de baja y alta densidad (PE), polipropileno, poliestireno, policloruro de vinilo (PVC) y otras resinas vinílicas que representan alrededor del 90 al 95% de los plásticos empleados en el envase y embalaje [4]. El resto lo forman termoplásticos como acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), polietilenterefthalato (PET), nylon, espumas de poliuretano, acrílicos y resinas termofijas como las fenólicas las epóxicas y las de poliéster.

De hecho, son tres los generadores de tales desechos plásticos, a saber: Las familias, las industrias y los comercios, los cuales contribuyen en los diferentes porcentajes mostrados en la Figura 1.7.

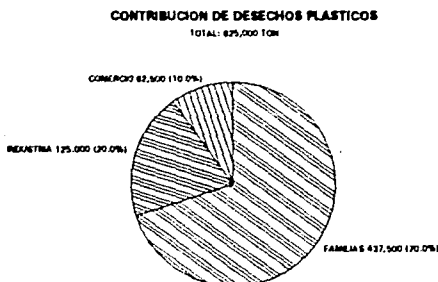


Figura 1.7. % de generación de basura plástica.

1.5 FACTIBILIDAD DE RECUPERACION Y RECICLAJE DE LOS DESECHOS PLASTICOS

1.5.1 Tipos de reciclado

Si definimos el reciclado como cualquier tipo de proceso en el que los materiales o artículos se recuperen y traten con el fin de obtener algún beneficio o producto adicional podemos establecer cuatro tipos de reciclado (8):

Reciclado primario. Aprovechamiento de los residuos en la misma línea de producción y con la misma aplicación a la que estaban inicialmente destinados. Se aplica, generalmente a los residuos industriales (recortes, rebabas, mazarotas, etc.) prácticamente sin sufrir degradación.

Reciclado secundario. Reprocesado en productos con menores exigencias de propiedades. Se refiere a la producción de materiales que tengan propiedades físicas y químicas inferiores al producto o polímero original.

Reciclaje para obtención de productos de bajo peso molecular. Reconversión de los residuos en compuestos químicos más simples. Mediante procesos tales como la pirólisis para obtener: ceras, aceites, grasas, monómeros, etc..

Reciclaje para la obtención de energía. Empleo de los residuos plásticos como fuente de energía. Incinerándolos para aprovechar la energía calorífica.

1.5.2 Posibilidades económicas del reciclado

Al estudiar las posibilidades económicas del reciclado de plásticos se deben tener en cuenta dos factores fundamentales:

-Costos directos de producción e ingresos, en estrecha relación con la tecnología necesaria para llevar a cabo el reciclado.

-Limitaciones o reservas, tanto técnicas como institucionales.

La viabilidad del reciclado de plásticos se basa en el balance directo de los costos de la operación, capital necesario, mano de obra, materiales y costos energéticos, y los ingresos directos estimados obtenidos en la venta del producto reciclado. Los procesos del reciclado se consideran viables económicamente cuando los ingresos directos estimados superan a los costos o, en algunos casos, si los costos netos no superan a los de su deposición en los rellenos sanitarios.

Consideremos, en primer lugar, los costos de deposición o su incineración. Los costos de deposición dependen del tamaño de la población, de la distancia al tiradero, del tipo de residuo, del tamaño de la operación de deposición, etc.. En general, existe una relación crítica entre el tamaño de la población y el costo. Así, según datos provenientes de la agencia de protección ambiental de U.S.A., para una población de 2,500 a 10,000 habitantes, el costo de la deposición es aproximadamente 6.98 US\$/ton (\$ del año 1981), mientras que para una ciudad de 250,000 a 500,000 habitantes, el costo asciende a 15.33 US\$/ton. (la media en U.S.A. oscila al rededor de 9.98 US\$/ton) [8].

Los costos de incineración, sin recuperación de energía, son mayores que los de deposición, dependen de la situación y tipo de equipo utilizado. Oscilan entre 8.66 y 22.77 US\$/ton., incluyendo los costos de deposición de los residuos originados por el proceso [8].

Con respecto al segundo tipo de reciclado, existen casos concretos en los que se conocen los costos de reciclado. Por ejemplo, el PET. Se dice que en el reciclado de PET procedente de botellas que se recojen separadamente de la basura, se produce un beneficio neto cuando el precio de venta del producto recuperado oscila entre 0.15 y 0.20 US\$/libra [8].

Existen una serie de técnicas y procesos que permiten un reciclado rentable de los plásticos y que utilizan mezclas de éstos como material de partida. Algunos de ellos pueden trabajar incluso con un 50% de materiales no termoplásticos en la mezcla.

Se basan en dos suposiciones:

-Los desperdicios plásticos se pueden obtener a bajo o ningún costo.

-Los artículos fabricados del desperdicio plástico pueden venderse a precios competitivos con productos similares fabricados con otros materiales.

Dado el relativo éxito de estos procesos, el interés por ellos esta creciendo, especialmente para su uso con determinados desperdicios de termoplásticos relativamente limpios.

Con respecto al reciclaje para obtención de productos de bajo peso molecular, la pirólisis es el proceso más discutido y puede considerarse a dos niveles:

-Pirólisis de plásticos como parte de los residuos urbanos.

-Pirólisis de residuos plásticos poco contaminados.

El reciclaje para la obtención de energía se aplica a los residuos plásticos como parte de los residuos municipales o como desperdicio relativamente limpio. Los costos de esta tecnología oscilan entre 2.39 y 30.72 US\$/ton [8]. En muchos lugares esta forma de reciclaje es más barata que la deposición. el calor obtenido a partir de los plásticos puede competir con las técnicas que utilizan el petróleo.

De lo anterior se deduce que;

1.- El reciclado de residuos plásticos relativamente limpios, mediante cualquiera de los cuatro tipos de reciclaje, tiene costos netos por debajo de los de deposición y en muchos casos pueden obtenerse sensibles beneficios.

2.- El reciclado de desperdicios municipales, en los que los plásticos se encuentran en poca proporción, es más caro que la deposición. Sin embargo, puede ser viable y económico en algunas zonas urbanas.

Los plásticos que puedan separarse fácilmente de los otros residuos urbanos, se reciclan en forma más rentable por si solos que formando parte de los residuos urbanos, mientras que los datos existentes indican que el reciclado de plásticos es, en general, una alternativa económica frente a la deposición.

1.5.3 Posibilidades técnicas del reciclado

Se tiene que analizar que grado de pureza debe exigirse a los residuos de plástico. Se calcula que alrededor del 25% del total de los residuos plásticos que formarán parte de la basura en la próxima década, se podrían recuperar mediante procesos que exigen la separación de los plásticos [8].

Una vez que el plástico entra a formar parte de los residuos urbanos su separación es más difícil y costosa. Sin embargo, la incineración con recuperación de energía y la pirólisis son técnicas utilizadas en muchos campos. Concluimos que entre más limpio tenga que estar el residuo plástico menos viable será la tecnología de su reciclado.

Otra cuestión de gran interés es la posibilidad de utilizar un mismo proceso de reciclado para diferentes materiales plásticos.

Se debe tener en cuenta el riesgo que debe traer consigo el reciclado, en comparación con la alternativa de deposición. En este sentido el problema es fundamentalmente tecnológico. Existe poca experiencia comercial con el reciclado. Todo ello supondría compensar adecuadamente a la empresa que se decida por la alternativa más arriesgada

de reciclar. Estos riesgos proceden de la poca confianza en el origen del residuo, de la variación de los costos de los materiales con el tiempo, de la inestabilidad institucional o legislaciones existentes, de la predisposición de los consumidores y de la preparación de canales de distribución apropiados.

La tecnología actual para el reciclado de plásticos no ha conseguido penetrar en mercados potenciales, debido, principalmente, a limitaciones técnicas e institucionales.

En el reciclado de los plásticos deben estar involucrados los gobiernos, los fabricantes de materias primas los consumidores, los transformadores de residuos y los municipios.

Los fabricantes pueden jugar un importante papel desde el punto de vista del diseño de los productos, ya que algunos polímeros y productos son más asequibles al reciclado que otros. Los consumidores podrían favorecer el reciclado de plásticos mediante su separación del resto de la basura.

Actualmente existen datos sobre mercados específicos, Entre ellos cabe nombrar: el reciclado de botellas de PET, residuos de equipos telefónicos, residuos procedentes de automóviles y de consumidores de embalajes.

El reciclado del PET recibe más atención que el de otros plásticos. En Estados Unidos la legislación existente ha contribuido precisamente al reciclado de este material ya que se han promulgado leyes referentes al depósito de botellas en muchos estados. Los consumidores deben separar el PET del resto de la basura, pero la ley concede incentivos económicos. Por otro lado los fabricantes también reciben apoyo por facilitar el reciclado del PET.

Puede decirse que todos aquellos procesos que no exijan una separación previa de los distintos materiales plásticos dominarán sobre otras técnicas. Sin embargo, la mayor parte de los problemas surgen de la ausencia de una legislación favorable y unas condiciones económicas sugestivas. Los plásticos que no puedan separarse fácilmente, se reciclarán mediante pirólisis, incineración o se utilizarán como carga.

1.5.4 Reciclado a nivel internacional

La tecnología para el reciclado de metales, vidrio y papel se ha utilizado durante más de 40 años, mismo tiempo de existencia de los materiales plásticos, mientras que la tecnología para su recuperación y reciclaje se desarrollo a mediados de los setentas [9].

La primera aplicación de este tipo de tecnología, a gran escala, tiene lugar en la empresa de reciclado SORAIN, construida hace catorce años en Roma. Esta instalación permita separar los componentes de las basuras en orgánicos, metales, vidrio, papel y plásticos, y su posterior reciclado. La planta de reciclado diseñada por una empresa italiana llamada SOREMA [8], se basa en un proceso de lavado y flotación, y fué aplicado, en principio, al reciclado de los desechos plásticos de origen comercial o procedente de aplicaciones agrícolas y posteriormente a los desperdicios domésticos.

Otros fabricantes europeos también suministran este tipo de proceso (Alemania y España), y se aplica en forma eficaz solamente a residuos relativamente limpios y de

composición constante, fundamentalmente a residuos provenientes del embalaje o industriales, debido a que los costos de la operación y más específicamente los costos energéticos, son altos en función del grado de contaminación. Estos procesos son rentables solamente cuando el precio de la materia prima y su demanda son altos.

Hace tiempo, cuando se tomó en consideración el reciclado de plásticos, se desarrolló en Japón una nueva tecnología por la Mitsubishi Petrochemicals, basada fundamentalmente en la máquina Reverzer, que permitía trabajar con los desechos plásticos en bloque, separados del resto de la basura, e incluso con alto grado de contaminación, transformándolos en productos tales como pellets, bobinas para cables, etc.. Surgieron dos plantas de reciclaje en Europa: una en Francia destinada a la fabricación de bobinas y otra en Inglaterra para la fabricación de productos de aplicación agrícola. Sin embargo, por razones económicas y técnicas, estas empresas cerraron, ya que las inversiones eran demasiado elevadas y el proceso no permitía una completa automatización.

Actualmente existen tres procesos a nivel industrial:

- El primero es el RHEO, de origen belga, que permite trabajar con mezclas de plásticos a partir de residuos relativamente limpios en forma de gránulos, y transformarlos de nuevo mediante inyección o extrusión en productos acabados de baja calidad. Este proceso fué desarrollado por la compañía FN, y no está a la venta. La empresa está interesada fundamentalmente, en atraer a fabricantes para desarrollar programas conjuntos dirigidos a una serie de aplicaciones específicas. El proceso es costoso y su viabilidad a gran escala no está asegurada.

- El segundo proceso actualmente en funcionamiento en Alemania es el RECYCLOPLAST. Se basa en la plastificación de los residuos plásticos en una extrusora especial, previa molienda y separación de las fracciones flexibles y rígidas de plástico. Después de la extrusión, el material fundido se moldea por compresión a altas presiones. No puede utilizar PVC y sirve específicamente para reciclar residuos industriales y comerciales de composición conocida y bien controlada. Es un proceso costoso.

- El tercer proceso se basa en una simple máquina de extrusión, capaz de producir con bajas presiones perfiles grandes y fuertes, desarrollado por la empresa LANKHORST. Dos características de este proceso son: el mecanismo de alimentación forzada y la adición de un agente espumante a los residuos antes de la extrusión. Actualmente la Advanced Recyclin Technology (ART), continúa con estas actividades, desarrollando una nueva máquina basada en los procesos Reverzer y Klobbie, que no exige una preclasificación de los residuos, ni alimentación forzada o adición de aditivos a los residuos. El equipo principal, consta de una extrusora (extrusión adiabática) con un husillo corto que gira a una velocidad relativamente alta que permite un buen mezclado de los plásticos y evita la degradación de los mismos, el proceso es completamente automático. Este proceso permite utilizar la mayoría de las mezclas de plásticos, incluyendo PVC y PET incluso con un 40% de contaminación (aluminio, textiles y papel), y se conoce como proceso ET-1.

El proceso ET-1 utiliza como material de partida los residuos de plásticos urbanos e industriales. Los residuos urbanos contienen aproximadamente de un 50 a un 65% de polietileno y polipropileno, y el resto consiste en PVC, PET, estireno, ABS, y otros plásticos ingenieriles. Por simple lavado se separan los residuos orgánicos. Sin embargo

los residuos secos de plástico, con etiquetas, cierres metálicos blandos, y otros materiales como papel, cartón y madera, se pueden utilizar directamente. Una condición indispensable es la presencia de un 50-60% de polietileno y/o polipropileno en el producto de partida (8).

El proceso ET-1, tiene además un bajo costo de operación, es fácil de fabricar, y permite su adaptación a las necesidades del mercado. Actualmente se encuentran en servicio más de 20 unidades distribuidas en Europa y Estados Unidos.

1.6 PRODUCCION Y CONSUMO DE PVC EN MEXICO Y EN EL MUNDO

En base a los objetivos del presente trabajo, se hace necesario la recopilación de información sobre la producción y consumo del PVC en México, a fin de establecer la factibilidad de obtención de materia prima (desechos) para su recuperación y reciclaje.

1.6.1 Abastecimiento de materia prima

El PVC requiere para su fabricación de gran variedad de materias primas, pero principalmente la del monómero cloruro de vinilo, el cual lo fabrica Petróleos Mexicanos, aunque no en la cantidad suficiente, por lo que se requiere importar aproximadamente una cantidad similar a la producida en el país., tal y como se muestra en los datos estadísticos reportados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Capacidad, producción, demanda y deficit de importación de monómero de cloruro de vinilo. 1980- 1989

AÑO	CAPACIDAD INSTALADA (ton)	VOLUMEN DE PRODUCCION (ton)	DEMANDA NACIONAL (ton)	DEFICIT IMPORTADO (ton)
1980	70,000	62,470	157,916	95,446
1981	70,000	56,899	149,871	92,972
1982	270,000	79,384	163,084	83,700
1983	270,000	134,357	233,188	98,801
1984	270,000	131,516	270,183	138,667
1985	270,000	107,751	288,221	180,470
1986	270,000	141,295	280,295	139,000
1987	270,000	178,808	312,808	137,000
1988	270,000	175,002	307,578	132,578
1989	270,000	182,736	310,200	127,464

1.6.2 Capacidad instalada

Debido al crecimiento continuo de la industria del PVC, cuyos inicios en México se dan en el año de 1955, y con un fuerte desarrollo a partir de 1983, la capacidad instalada ha tenido un crecimiento, en los últimos ocho años del 8.8% aproximadamente.

En el año de 1990 la capacidad instalada creció a 319.800 toneladas al año. Actualmente en México existen cuatro empresas, que atienden aproximadamente a 650 clientes en el país. En la Tabla 1.3, se hace mención de cada una de ellas, de su capacidad, del proceso de polimerización que utilizan, así como su marca comercial.

Tabla 1.3. Capacidad instalada para la producción de PVC.

EMPRESA	CAPACIDAD (ton/año)	PROCESO	MARCA
PROMOCIONES IND. MEXICANAS	115,000	SUSPENSION	PRIMEX PROVIN
POLICYD	104,000	SUSPENSION EMULSION	VINICEL
POLIMEROS DE MEX.	70,000	SUSPENSION EMULSION MASA	IZTAVIL
ALTA RESIN	30,800	SUSPENSION	ALTA RESIN
TOTAL	319,800	3 TIPOS	5 MARCAS

1.6.3 Producción y consumo

En México, de 1953 a 1955, se instalaron las primeras plantas productoras de la resina de PVC. Desde este tiempo a la fecha la industria productora ha sido capaz de satisfacer en forma adecuada la demanda nacional, de los diferentes tipos de resina, inclusive debido a su calidad, está compitiendo desde hace más de siete años, como el noveno exportador mundial de los mercados internacionales.

En la Tabla 1.4 se muestra la producción de PVC en México de 1980 a 1989, la cual, podrá proporcionar una idea del desarrollo de esta resina.

Respecto al consumo nacional, éste se satisface con la producción nacional. La Tabla 1.5, muestra el consumo de PVC a nivel nacional en la última década.

Tabla 1.4. Producción de PVC en México.

AÑO	CAPACIDAD INSTALADA (ton)	P R O D U C C I O N		PRODUCCION TOTAL (ton)	EXPORTACION TOTAL (ton)
		HOMOPOLIMERO	COPOLIMERO		
1980	148,200	122,541	11,966	134,537	3
1981	220,300	131,522	10,652	142,174	112
1982	223,300	142,532	12,152	154,684	17,746
1983	282,000	189,985	10,401	200,386	67,513
1984	297,000	251,251	11,700	268,981	124,679
1985	297,000	262,883	11,109	273,992	119,466
1986	313,000	264,806	7,400	272,206	150,520
1987	313,300	283,743	7,212	290,955	163,319
1988	319,800	270,432	7,000	277,432	143,463
1989	319,800	277,212	8,114	285,326	148,000

Tabla 1.5. Consumo de PVC en México.

AÑO	CONSUMO (ton)	INCREMENTO %
1980	140,000	15.2
1981	148,500	6.0
1982	141,000	-5.0
1983	136,000	-3.5
1984	141,000	3.4
1985	158,000	12.0
1986	126,000	-20.3
1987	127,000	1.2
1988	134,000	5.0
1989	134,000	0.0
1990	138,000	1.0

1.6.4 Distribución por segmento

El mercado de consumo nacional del PVC se encuentra dividido principalmente en tres sectores: rígido, flexible y emulsión. El consumo en particular en el año de 1989 se muestra en la Figura 1.8, en la cual se puede observar que el sector de mayor consumo en la actualidad es el rígido, le sigue en importancia el de los flexibles y por último el de la resina de emulsión.

COLORURO DE POLIVINILO
REPARTICIÓN DE MERCADO

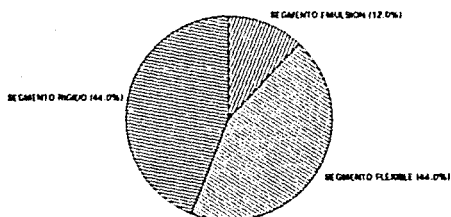


Figura 1.8. Consumo nacional de PVC por sectores en 1989.

Según la aplicación, el porcentaje de consumo en cada uno de los sectores se subdivide conforme a la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Aplicación del PVC en los diferentes segmentos.

APLICACION	%	SECTOR
TUBERIA	19.6	R
BOTELLA	18.7	R
CALZADO	10.6	F
PELICULA	9.8	F
CABLE	7.6	F
TELA PLASTICA	7.0	E
VARIOS	4.9	F
RECUBRIMIENTO DE TELA	4.0	F
PELICULA	3.4	R
PERFILES	3.1	F
PLASTISOL	2.7	F
PLASTISOL	1.4	E
LOSETA	1.3	F
DISCOS	1.3	R
PLASTILATA	1.2	E
VARIOS	1.2	E
JUGUETES	1.2	E
PERFILES	0.9	R

F: Flexible
R: Rígido
E: Emulsión

1.6.5 Panorama del PVC en el mercado internacional

Para darse cuenta del éxito y la importancia del PVC, a nivel internacional, solo basta hacer un breve análisis del consumo de este polímero en lugares tales como Estados Unidos, Europa y Japón, como se muestra en la Tabla 1.7, que en conjunto representan el 86% de la producción mundial.

El crecimiento de la producción mundial de PVC para el período 1987-1990, se estima en 25% y el crecimiento en el consumo para este período de 16.9%.

El principal uso del PVC en el mundo es en el segmento tubería y conexiones, donde tiene una participación en el mercado del 42%.

Tabla 1.7. Proyección de la demanda de PVC en el mercado internacional (miles de toneladas).

REGION	PRODUCCION		CONSUMO		CAPACIDAD	
	1987	1990	1987	1990	1987	1990
USA	3,104	3,288	3,090	3,080	3,985	3,985
CANADA	280	305	230	250	365	370
EUROPA ORIENTAL	1,914	2,105	1,654	1,803	2,648	2,648
EUROPA OCCIDENTAL	4,262	4,355	3,991	4,141	5,232	5,152
JAPON	1,530	1,550	1,585	1,680	1,584	1,584
LATINOAMERICA	911	1,085	905	1,113	1,190	1,377
MEDIO ORIENTE	323	353	490	607	447	477
AFRICA	277	312	475	611	320	340
TOTAL	12,601	15,771	12,420	13,385	15,771	15,933

1.6.6 Proyección de la demanda en el mercado nacional

Actualmente la industria del PVC es uno de los sectores industriales con mejores perspectivas de desarrollo para los próximos años, la existencia de vastos recursos petroleros en México, el volumen de inversión de capacidades instaladas de PVC, la repercusión de la demanda en capacidades instaladas de PVC, la repercusión de la demanda interna de productos de PVC y el ingreso de nuestra resina en el comercio exterior son elementos que en conjunto presentan un panorama más halagador en su futuro.

Otro de los factores relevantes, es el apoyo permanente que se proporciona a los consumidores de PVC para la exportación de sus manufacturas.

Se estima, de acuerdo a la demanda interna de la última década, que para 1992 el consumo sea del orden de 140,000 a 150,000 toneladas tal como se aprecia en la Tabla 1.8 [10,11].

Tabla 1.8. Proyección de la demanda de PVC.

AÑO	CONSUMO APARENTE	CRECIMIENTO %
1988	134,000	5.0
1989	134,000	0.0
1990	138,000	2.9
1991	144,000	4.3
1992	149,000	3.4

1.7 JUSTIFICACION DEL RECICLAJE DE BOTELLAS DE PVC

1.7.1 Peligro en la incineración del PVC

El uso del cloruro de polivinil ha estado bajo constante ataque desde 1973 debido a los problemas que ocasiona al medio ambiente y a la salud. Se han propuesto regulaciones en Europa y Norte America, limitando el uso del PVC particularmente en el empaque.

Los fabricantes y distribuidores de PVC están en lucha constante para convencer que el polímero puede ser reciclado e incinerado sin causar problemas ecológicos.

Un estudio del gobierno Danes sugiere que el PVC juega un papel importante en la formación de dioxinas policloradas tóxicas, generadas en incineradores municipales. Hasta el momento los estudios no se han concluido, los industriales lo niegan. La industria del PVC crea un poco más del 1% de la basura sólida municipal, pero aun así, esta pequeña cantidad complica el reciclado de otros materiales como el PE y el PET.

En contra de los cargos ecologistas, la alta eficiencia energética del material, crea un mercado prometedor para el PVC.

Existen un gran número de regulaciones acerca del papel que juegan los empaques de PVC en los incineradores municipales, ya que en la incineración se despiden ácido clorhídrico (HCl) y átomos libres de cloro. Este es un gran problema particularmente en Europa donde el 30% de la basura municipal es incinerada y el 0.7% se trata de PVC. En los Estados Unidos se incinera cerca de 15% de los desperdicios municipales, donde el 0.4% es PVC.

Estudios conducidos por el Instituto de Ecología Terrestre de Edimburgo, Escocia, señala que el 3% del HCl atmosférico proviene de la incineración del PVC, lo cual contribuye al 0.2% de la lluvia ácida. En comparación, la combustión del carbón contribuye al 93% del HCl atmosférico [12].

1.7.2 Perspectivas para el reciclaje de PVC

La década de 1990 está consolidándose como una era de exceso de basura y disminución de tiraderos. Los fabricantes y proveedores de policloruro de vinilo tratan de convencer a los reguladores y legisladores, de que el PVC es factible de reciclarse cuando el periodo de vida útil del producto ha finalizado.

Una duda generada por la US Food and Drug Administration (FDA) concierne a la eficiencia del PVC para su reutilización. La agencia federal ha ocupado de forma intensa a sus investigadores sobre ciertas dudas que cubren los métodos actuales y alcance del reciclado de PVC, como son: las posibles emisiones de ácido clorhídrico durante el proceso de incineración e incluso durante el reciclado; así como los efectos que la adopción del polímero puede tener sobre los programas de reutilización de otros tipos de materiales.

Roy Gottesman, director ejecutivo del Vinyl Institute, una división de la Society of the Plastics Industry (SPI), declara que "el polímero vinílico puede ser eliminado de forma segura por cualquiera de los métodos empleados actualmente para residuos, tales como reciclado, tiraderos o incineración". Gottesman asegura: "El PVC material termoplástico es eminentemente reciclable...", lo cual viene a incrementar el optimismo de la industria acerca de las posibilidades de reciclado del PVC. Sin embargo, el aspecto práctico de la reutilización del PVC está en sus primeras etapas. La pequeña proporción reciclada en U.S.A. lo ha sido en mezclas de residuos plásticos lo cual según la opinión de algunos puede llegar a ser un inconveniente.

Don Knechtges, director comercial de Polímeros Vinílicos de la BFGoodrich, sugiere que la estructura actual del mercado del PVC es perfectamente adecuado para el reciclado. Los mercados de polímeros vinílicos forman una pirámide en la cual una cúspide estrecha situada en la parte superior, de corto periodo de vida, demanda materiales de costo más elevado (botellas, películas, perfiles de ventanas y envases burbuja) con una base más ancha de periodo de vida más largo, con una menor demanda y con mercados de costo más bajo (incluyendo tuberías para drenaje, conductos eléctricos y una diversidad de aplicaciones menos significativas). El escenario más lógico de reciclado supone una reutilización desde mercados de alta calidad de primer uso a mercados de artículos de baja calidad.

Los esfuerzos para recuperar grandes volúmenes de residuos contaminados de consumo previo no reutilizables en operaciones internas han tenido un éxito solamente parcial. Se supone un total de al menos de 184,000 toneladas anuales y la industria estima que aproximadamente tres cuartas partes de esta cantidad actualmente acaba en el tiradero. Aunque esta cifra supone menos del 5% del total de PVC utilizado en los U.S.A., resulta ser una cantidad respetable. El resto de este flujo de materiales vinílicos contaminados sirve de alimentación a una sorprendente y fuerte industria de reutilización de PVC [13].

Se han instituido y propuesto nuevas regulaciones que fijan un porcentaje de materiales reciclados para empaque en Europa y Estados Unidos. Muchas de estas propuestas tratan de aumentar tarifas en productos que contienen materiales vírgenes. Algunas propuestas estatales fijan que los materiales para empaque sean reciclados hasta cinco veces. En estos momentos, el PVC es reciclado en bajas proporciones.

Fred Krause, director de la división de Soluciones Ambientales de la BFGoodrich, dice "Se espera que el reciclado del PVC ya utilizado se incremente por encima del 20% para 1993".

George Voituron, gerente de innovaciones del medio ambiente en Solvay, dice "el PVC puede ser reciclado, y la industria está trabajando para enfrentar y resolver los problemas. Debemos demostrar la factibilidad del reciclado".

Actualmente el principal competidor del PVC es el PET, el cual en los Estados Unidos se recicla en más de un 20%, mientras que el PVC se recicla en menos del 1% [12].

En México la industria del PET no ha alcanzado gran desarrollo, mientras que la industria del PVC muestra grandes perspectivas ha futuro como se aprecia en la sección anterior.

Los artículos más adecuados para lograr la reutilización del PVC desechable son en la actualidad las botellas las cuales suponen alrededor de 100.000 toneladas anuales en los Estados Unidos. En nuestro país el consumo de botellas de PVC en 1989 fue de 25,000 toneladas. Las dificultades surgen del hecho de que las botellas provienen de diversos mercados (champú, aceite vegetal, crema, aderezos, agua y productos de limpieza). La tasa de ventas de botellas en los mercados de PVC tiende a ser baja y no es fácilmente reconocido por el público (como es el caso de las botellas transparentes de PET para sodas y la opaca de polietileno de alta densidad para leche en U.S.A.).

Los líderes de la industria están encontrando nuevas vías para la reutilización de botellas de PVC. Hasta la fecha se ha establecido un consorcio de seis importantes fabricantes de botellas de PVC y proveedores de aditivos. También hay intentos que ya están en camino y realizados a escala individual por diversas compañías, incluyendo a la Rohm & Haas, Oxychem, Georgia-Gulf Corp. y la BFGoodrich. Esta última compañía está ensayando las propiedades del PVC remolido. Las investigaciones demuestran que la botella de PVC rica en aditivos retiene un nivel de propiedades suficiente para su viabilidad en mercados tales como el de botellas para productos no alimenticios, uniones para tubería y tubería para desagüe. La formulación de las botellas de PVC, así como las propiedades físicas del polímero se encuentran en el Apéndice A.

Una etapa importante hacia la separación de las botellas de PVC recogidas de tiraderos es la adopción por el SPI a mediados de 1988 de un código voluntario de reciclado de éstas. Este código incluye las siglas PVC y el número 3 en el interior de un logotipo de reciclaje, el cual se muestra en la Figura 1.9.

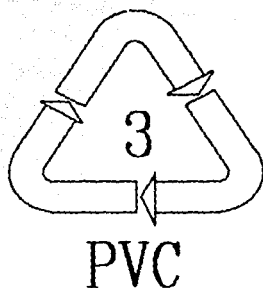


Figura 1.9. Logotipo de reciclaje para el PVC.

Un procedimiento más radical está siendo llevado a cabo mediante un proyecto conjunto europeo. La acción, realizada por tres suministradores de resina de Europa Occidental, tiene su planta en Ferrara, Italia y emplea una técnica de exploración electromagnética, comercializada bajo el nombre de Technoplast, que sirve para identificar y separar las botellas de PET de las de PVC de una forma automática, identificando el átomo de cloro. William Carrol, director del Commercial development at Oxychem, dice "el átomo de cloro va a ser del PVC el plástico más reciclable en el futuro cercano" [12].

2 DISEÑO DEL PROCESO

Ante la necesidad mundial de establecer sistemas de reciclaje para los diferentes materiales plásticos y las perspectivas de éxito que se plantean en los desarrollos mencionados anteriormente; la segunda parte de este trabajo, consiste en desarrollar un proceso adecuado a las condiciones económicas de México para el reciclaje de envases de PVC.

Este desarrollo, se realiza bajo una metodología que involucra en una primera etapa la verificación de la disponibilidad de materia prima (PVC de desecho), la caracterización de la misma, y la determinación de los factores o variables determinantes para su reciclado.

La segunda etapa del desarrollo, se basa fundamentalmente en el trabajo experimental para la optimización de los parámetros de recuperación, limpieza y reciclaje del PVC. Así como la evaluación de las propiedades fisicomecánicas del PVC reciclado.

Finalmente en una tercera etapa se propone el diseño a nivel industrial de un sistema semicontinuo derivado de las experiencias obtenidas a nivel laboratorio y piloto .

A continuación, se describen cada una de las actividades de estas etapas; descripción en la que se incluye un análisis de condiciones y propuestas para la solución de las mismas.

2.1 VERIFICACION DE LA DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA

Existen dos fuentes principales de desechos de botellas de PVC. La primera de estas fuentes se refiere a los desechos industriales procedentes de la industria manufacturera de botellas. La segunda consiste en desechos urbanos procedentes directamente de los consumidores.

Los desechos industriales se encuentran fuera de este estudio, ya que es un material relativamente limpio, por lo que su reciclaje es más sencillo y es manejado en general por las mismas industrias manufactureras.

Los desechos urbanos representan en la actualidad un gran problema, como se describió en el Capítulo 1, en el caso particular de las botellas, éstas son depositadas por el consumidor mezcladas con el resto de los desperdicios urbanos, teniendo como destino, en el mejor de los casos los rellenos sanitarios.

Actualmente en los tiraderos de la zona metropolitana, previo a la ejecución de los rellenos sanitarios, los pepenadores separan manualmente los diferentes materiales útiles y aprovechables como: vidrio, papel y cartón, metales ferrosos, metales no ferrosos, aluminio, plásticos y elastómeros, hueso, trapo, etc.. El resto es considerado material inservible, por lo que es enterrado en el relleno sanitario.

En cuanto a los materiales plásticos, éstos se separan en: bolsas de polietileno, artículos de polietileno y espumas de poliestireno. El resto de los materiales plásticos incluyendo todos los termofijos y algunos termoplásticos como el PVC y el PET, no son separados, por lo que pasan a formar parte del relleno sanitario.

Para el desarrollo de esta investigación, se llevo a cabo un trabajo de campo, en el relleno sanitario Prados de la Montaña, a fin de determinar la factibilidad de el reciclado y la calidad de desechos de botellas de PVC.

Referente a la factibilidad de recolección, ésta resulto ser positiva en el sentido de que los pepenadores pueden separar las botellas de PVC en volúmenes de 4 toneladas mensuales, con un precio de \$300 a \$400 kg (incluyendo transportación).

2.2 ANALISIS DE LAS CONDICIONES DEL PROBLEMA

Una vez justificada la recuperación y el reciclaje de PVC se continuó con el trabajo de campo y estudios experimentales, con el fin de establecer las opciones o alternativas de procesamiento para lograr el reciclaje del PVC. Cabe señalar, que dichas alternativas de procesamiento deben entenderse como actividades o etapas de un proceso. Bajo este contexto y a partir de las observaciones dentro del trabajo de campo, el proceso de reciclaje requiere de al menos cuatro etapas. Estas cuatro etapas, que conforman cada una de ellas un sistema operacional son:

Recolección: Obtención de materia prima

Transporte: Traslado de materia prima del lugar de recolección a la planta procesadora.

Selección: Separación fina de materiales degradados y verificación de tipo de material.

Limpeza: Eliminación de contaminantes.

2.3 ANALISIS Y SELECCION DE ALTERNATIVAS

A continuación se presentan algunas alternativas para la solución de los diferentes sistemas del proceso de reciclado, en base a los criterios señalados en el Apéndice B.

La selección en algunos sistemas se realiza en base al trabajo de campo y a la experimentación, ya sea a nivel laboratorio o a nivel planta piloto; sin embargo, la selección final de alternativas se basará en la evaluación de propiedades del material recuperado.

2.3.1 Sistema de recolección

Definición de condiciones y requerimientos para su recolección.

Esta deberá ser lo más rápida de implementar y con un bajo costo de recolección, buscando obtener un material poco contaminado y sin degradación de rayos ultravioleta. Las alternativas analizadas para el proceso de selección son: valor de depósito en la compra del producto, recolección selectiva y pepena.

Valor de depósito en la compra del producto:

Consiste en darle un valor al recipiente que contiene al producto, recuperándolo al regresar éste al comerciante, intentando forzar al consumidor a devolver el envase, evitando así su deposición y la generación de desperdicios.

El comerciante distribuirá el desperdicio a la industria recicladora, entregando un desperdicio poco contaminado y sin degradación provocada por los rayos ultravioleta del sol. Es, sin duda, un sistema difícil de implementar debido al rechazo por parte de los consumidores y al gran número de puntos comerciales.

Recolección selectiva:

Se basa en la separación de los materiales reciclables por parte del generador de desperdicios, facilitando su recolección y logrando menor contaminación en estos materiales. Los residuos plásticos deberán separarse por el reciclador de acuerdo a su aplicación original, generando una gran disminución del volumen de desperdicios y la obtención de diferentes materiales reciclables. Este tipo de recolección requiere de sistemas complejos para llevarla a cabo eficientemente y de un largo periodo de implantación debido a la falta de cultura de la población.

Pepena:

Es la separación manual de las botellas, en los tiraderos de basura urbana, por un grupo de recolectores a los que se les pide un tipo de desperdicio en particular. De acuerdo a las condiciones que prevalecen en los tiraderos de basura éste es un sistema de ágil implementación. De esta forma se obtiene un material a reciclar altamente contaminado y que ha sido expuesto a los rayos ultravioleta del sol. Este sistema de

recolección trae consigo la insanidad de los individuos dedicados a la pepena, promueve el caciquismo de recolectores y los problemas sociales de los tiraderos de basura.

Analizando nuestras posibilidades de recolección, se eliminan las alternativas de aumentar el valor del producto para la devolución de la botella y la deposición selectiva, ya que se requiere de mucho tiempo e inversión para la implementación de cualquiera de estas dos alternativas. Como única alternativa viable en este momento está la pepena, la cual tiene algunas desventajas de menor importancia que las que nos impiden el uso de las otras alternativas, por lo que será la utilizada en este trabajo.

Sin embargo, las primeras dos alternativas deben tenerse presentes, ya que como se observó en un principio, se deberán implementar en el futuro mecanismos de recolección más apropiados, a fin de lograr el reciclaje de la totalidad de los desechos humanos.

2.3.2 Sistema de transporte

Uno de los problemas que se presentan es la forma de transportar estas botellas desde el relleno sanitario hasta la planta piloto, debido al gran volumen que ocupan y a su bajo peso, haciendo muy ineficiente su transportación.

El transporte deberá ser lo más eficiente posible, esto es transportar la mayor cantidad de botellas de PVC al menor costo posible, sin causar problemas posteriores en el proceso de recuperación y reciclaje, uno de estos podría ser la difícil identificación de las diferentes botellas. Las alternativas analizadas para transportar las botellas son: botellas aplastadas, botellas cortadas y botellas enteras.

Botellas aplastadas:

Consiste en compactar las botellas en el lugar mismo de su recolección, mediante presión aplicada por una prensa ó rodillos, disminuyendo el volumen ocupado por las botellas, aumentando la cantidad de material a transportar. Este sistema en algunos casos elimina la tapadera de polietileno y se logra una sencilla identificación del tipo de botella. Se requiere de maquinaria en el relleno sanitario y se forman dobleces en las botellas, dificultando el proceso de lavado.

Botellas cortadas:

Este método se basa en cortar las botellas en pequeños pedazos en el mismo lugar de recolección, con un cortador de cuchillas, reduciendo el volumen ocupado por el material, aumentando en gran forma la capacidad de transporte y eliminando el proceso de selección. De aquí se imposibilita la identificación del tipo de botella y se pueden incluir otro tipo de materiales por lo que este sistema funcionará únicamente para reciclar mezclas de materiales.

Botellas enteras:

Es el transporte de las botellas, tal y como se obtienen del depósito de recolección, ocupando un gran volumen y disminuyendo la cantidad del material a transportar facilitando la identificación del tipo de botella, pero disminuyendo en gran forma la

cantidad de material a transportar.

En este caso, considerando que las botellas se obtienen de la pepena, la opción económicamente más rentable resulta ser la de transportación de botellas enteras aplastadas.

2.3.3 Separación, verificación del tipo de plástico del envase y sistema de selección

Dado que no todas las botellas de aceite comestible o similares son elaboradas de PVC, sino que también se fabrican de PET, es necesario conocer e identificar el tipo de material de cada botella. Esto debido a que dichos plásticos son termodinámicamente incompatibles entre sí. Ninguna de las mezclas termodinámicamente no compatibles, presenta mejores propiedades que los componentes. Esta disminución de propiedades se debe, no sólo a la incompatibilidad termodinámica de los polímeros, sino también a la distinta morfología o microestructura de las mezclas motivada por su composición y por las condiciones y técnicas de procesado. El tamaño de partícula de la fase discreta, su homogeneidad o heterogeneidad, y grado de dispersión directamente dependientes del comportamiento reológico en fundido, son factores morfológicos determinantes de las propiedades finales [8].

En caso de utilizar mezclas de estos polímeros, el PET debe primero ser granulado finamente de tal forma que actúe como una carga en los productos moldeados.

Existen numerosos estudios sobre la compatibilidad de mezclas poliméricas. El PVC resulta ser sólo compatible con algunos polímeros como: poli etil metacrilato, poli propil metacrilato, poli butil metacrilato, poli isobutil metacrilato y copolímero butadeno-acrilonitrilo [14].

Considerando lo anterior, se realizó un primer estudio experimental a fin de determinar cuales botellas son de PVC y cuales no lo son, así, con un primer lote de 1082 botellas se analizaron también características como: peso promedio, grado de degradación y marca comercial.

Peso promedio. Se pesaron en total 1080 botellas pesando 52.155 Kg. Con un peso promedio de 48.2 g.

Grado de degradación. Dentro de este lote de botellas se presentó una completamente degradada presentando una coloración café muy fácil de identificar, también se encontraron botellas con poca degradación presentando una tonalidad amarilla. Esto se debe a que el PVC es uno de los plásticos más susceptibles a la degradación causada por los rayos ultravioleta y a la intemperie.

Marca comercial. Dentro del trabajo de campo, se detectaron 28 marcas de aceite comestible y 16 marcas de otros productos, las cuales se enlistan a continuación:

MARCA	PRODUCTO
1. Alianza	Aceite comestible
2. Alpina	Agua purificada
3. Astro	Aceite comestible
4. Aurrera	Agua mineral
5. Barrilito	Vinagre de alcohol de caña
6. Capi	Aceite comestible
7. Capullo	" "
8. Casa	" "
9. Cordial	" "
10. Cosinera	Aceite comestible
11. Cristal	" "
12. Dekomer	" "
13. Dorina	" "
14. Electropura	Agua purificada
15. Evian	Agua mineral
16. Fabuloso	Limpiador líquido
17. Fontanet	Agua purificada
18. Fonte Limpia	Agua mineral
19. Gadi	Jarabe
20. Grano de oro	Aceite comestible
21. Hisa	" "
22. Humaya	" "
23. Imperial	" "
24. Kártamus	" "
25. Kerenke	Vodka
26. Libertador	Aceite comestible
27. Lucero	" "
28. Maravilla	" "
29. Marfil	" "
30. Mennen	Shampoo
31. Osmopura	Agua purificada
32. Patrona	Aceite comestible
33. Pino Aloma	Limpiador
34. Pino Klin	" "
35. Pinol	" "
36. Pirámide	Aceite comestible
37. Premier	" "
38. Pschitt	Jarabe
39. Sahuayo	Aceite comestible
40. Sarita	" "
41. Tampicosa	Salsa picante
42. Victoria	Aceite comestible
43. Volcán	" "
44. 1-2-3	" "

A fin de verificar el tipo de polímero empleado en la fabricación de cada marca, se realizaron tres pruebas de laboratorio:

La primera prueba consistió en analizar la solubilidad de las muestras en tetrahidrofurano (THF), solvente característico del PVC. Observando que no todas las muestras fueron solubilizadas por el solvente.

La segunda prueba consistió en analizar su comportamiento al incremento gradual de temperatura observando cambios en su coloración, plasticidad, degradación y punto de fusión, siendo este comportamiento de dos tipos, el primero degradándose el material completamente a los 225°C (temperatura de degradación del PVC) y el segundo sin mostrar rasgos de degradación a los 250°C.

En la tercera prueba se obtuvo el espectro infrarrojo de cada una de las muestras, analizando los espectros se demostró que no se trataba de un mismo material. Se realizó también una prueba espectroscópica a los materiales que forman la tapadera y la válvula de las botellas, verificando que están fabricadas con polietileno de baja densidad.

Los resultados obtenidos en los tres experimentos son concordantes, por lo que se puede tener una gran confiabilidad en el primero de ellos que además resulta ser el más accesible y económico.

Selección

La selección de las botellas, tendrá que ser lo más eficiente posible, eliminando por completo las botellas que presenten degradación, y separando las botellas de PET. También tendrá que ser lo más barata y fácil de implementar. Cabe recordar aquí, que existe la alternativa de no separar las botellas de PET de las de PVC, reciclándolas conjuntamente. Las alternativas analizadas para el proceso de selección son: separación manual, separación por solubilización, separación electromagnética, separación por flotación y sin separación de material.

Separación manual:

Realizada por un individuo, con conocimiento del material de partida de las botellas según la marca, rechazando las que muestran degradación y las que carezcan de identificación. Es una alternativa de implementación sencilla y a bajo costo trayendo consigo un proceso poco productivo y posibles errores del personal.

Separación de plásticos por solubilización:

Este proceso de separación se emplea principalmente para la recuperación de PVC. El material se corta en trozos pequeños y se coloca en un recipiente sellado. Se añade THF en presencia de un gas inerte para evitar la degradación del PVC. El sistema se calienta hasta una temperatura próxima a la de ebullición del THF. La resina se disuelve y se transfiere a un tanque de almacenamiento. Se requiere un mínimo de tres lavados para completar la extracción. La solución polimérica se filtra para eliminar pigmentos, cargas y aditivos, después se pasa a un evaporador para concentrarla. El secado final se lleva a cabo mediante evaporación al vacío. El producto así obtenido es tan puro como la resina virgen inicial. El disolvente es reciclado durante el proceso (8). En este proceso se logra un alto nivel de producción requiriendo alta inversión inicial y altos costos de operación.

Separación electromagnética:

Actualmente se desarrollan tecnologías para separar el PVC de otros plásticos, particularmente el PET, por sistemas electromagnéticos que separan las botellas de PVC, identificando el átomo de cloro [12]. Con este sistema se obtienen altos niveles de producción debido a una automatización completa. Esta tecnología es nueva y de difícil acceso, requiere de una gran inversión inicial y de altos costos de operación.

Separación por flotación:

Este método se basa en las diferentes densidades de los plásticos. Se sumerge la mezcla de plásticos, en soluciones acuosas, alcohólicas y salinas, separándose los materiales en grupos genéricos de diferentes densidades.

El PET y el PVC tienen densidades similares, por lo que la técnica de flotación no puede separarlos [9].

Sin separación de material:

Esta no sería propiamente una alternativa de selección, ya que para este caso se reciben las botellas y se cortan conjuntamente sin realizar separación según el tipo de material, reciclando mezclas de materiales eliminando un paso del proceso sacrificando la calidad del producto.

Debido al alto costo de inversión y a la dificultad de obtener la tecnología, en este caso se elimina directamente la alternativa de separación electromagnética. La separación de plásticos por disolución requiere de una gran inversión inicial y un costo de operación muy elevado, lo que la elimina de nuestras alternativas de selección.

La densidad del PVC y la del PET son muy similares por lo que el método de flotación no funciona, sin embargo, este método lo podemos utilizar para la separación del polietileno proveniente de las tapaderas y de las válvulas.

Después del filtrado de las alternativas nos quedan dos posibles soluciones, la separación manual y no separar los diferentes plásticos. Por el momento no se puede tomar una decisión adecuada, ya que ésta tendrá que tomarse después de una serie de experimentos que nos demuestren las propiedades de los productos reciclados, de las dos alternativas seleccionadas.

2.3.4 Sistema de limpieza

Con el lote de muestras antes mencionado se observaron las condiciones de la materia prima, analizando el grado de contaminación que presentan las botellas.

Grado de contaminación. Los contaminantes que presentan las botellas dificultan el reciclado o bien disminuyen las propiedades mecánicas del producto recuperado, los cuales deben ser eliminados por medio de algún proceso de lavado. Los contaminantes encontrados son: etiqueta de papel, adhesivos de la etiqueta, tapadera de polietileno, válvula de polietileno, residuos del contenido (en su mayoría aceite), tierra, etc.

Limpieza

El método de limpieza busca eliminar la totalidad de contaminantes que afectan las propiedades del producto recuperado. En este sistema se busca una alta eficiencia que esté en función del poder detergente de la solución, cantidad del material y el costo del proceso. Las alternativas analizadas para el proceso de limpieza son: corte geométrico de las botellas, limpieza de tinta por medio de solventes y lavado termodinámico de superficies.

Corte geométrico de las botellas:

Se puede cortar la botella en tres partes, las cuales contienen diferentes contaminantes que se pueden tratar por diferentes métodos de limpieza. Estas tres partes y sus contaminantes principales son:

- La boca de la botella, generalmente contaminada con la válvula y la tapadera de polietileno.
- El centro del cuerpo de la botella contaminado con el adhesivo, la etiqueta de papel o tinta.
- El resto del cuerpo de la botella, contaminada únicamente por los residuos del contenido, tierra y otras sustancias.

Este sistema tiene mayor producción debido a un lavado selectivo y elimina completamente el polietileno, añadiendo un paso al proceso y elevando los costos de operación. Este sistema requiere de un lavado termodinámico posterior.

Limpieza manual de tinta por medio de solventes:

Utilizando solventes orgánicos que no atacan el PVC, se elimina la leyenda inscrita en algunas botellas, siendo el proceso ineficiente y requiere de un lavado termodinámico posterior.

Lavado termodinámico de superficies:

Consiste en un método fisicoquímico para la eliminación de impurezas, en el cual, el material cortado se mezcla con una solución acuosa con detergentes, con una baja tensión superficial, a la cual se le aplica fuerte energía de movimiento por medio de un agitador giratorio, creando una interacción del líquido detergente con el material sucio, eliminando las impurezas superficiales de las botellas.

Una vez terminada la operación de limpieza del material resultan necesarios, una serie de procesos para completar el reciclado del PVC, estos procesos son: enjuague, secado y molido del material. A continuación se especifica el tipo de maquinaria utilizada así como las razones que hacen necesarias estas operaciones.

Enjuague. Al separar el material limpio de la lavadora, éste se queda impregnado de la solución detergente la cual puede afectar las propiedades mecánicas del producto reciclado. La forma más eficiente para eliminar estos residuos líquidos es por medio de un enjuague del material dentro de agua con una fuerte agitación. La maquinaria más

adecuada para hacer este enjuague es un equipo similar al que se utiliza para el lavado

Secado. A fin de desarrollar un sistema continuo de reciclado es necesaria una eliminación de humedad en el material. Recurriendo a la literatura se encuentran gran diversidad de secadores. En este caso se requiere de un secado continuo, a baja temperatura con el fin de evitar la degradación térmica del material y se busca el mayor porcentaje de eliminación de humedad, por lo que se optó por un secador de aire a contraflujo.

Molido. Al utilizar este material para su procesamiento se requiere una presentación de partículas pequeñas, a fin de que fluya fácilmente dentro de la maquina que realiza la transformación. Tomando en cuenta la alternativa de utilizar una mezcla de polímeros, el molido deberá ser aun más fino a fin de utilizar el PET como carga sin que afecte las propiedades mecánicas del producto. La maquinaria adecuada para moler el plástico es la misma que se utiliza para el corte anterior al proceso de limpieza. Utilizando diferentes tamices se logra el tamaño de partículas requerido.

El método de lavado termodinámico de superficies tiene una baja inversión inicial y bajos costos de operación sin existir desperdicio de material. Esta alternativa no elimina la tinta ni el contaminante de polietileno.

La limpieza de la tinta de algunas botellas por medio de solventes orgánicos es un proceso muy lento ya que tendría que realizarse individualmente, la cantidad de tinta que traen consigo las botellas no afecta las propiedades del producto, por estas dos razones se elimina la alternativa de limpieza de tinta.

Se cuenta con dos alternativas, la primera de ellas es el lavado termodinámico de superficies, la cual deberá de utilizarse aun cuando se elija la segunda opción. La segunda de ellas requiere de una maquinaria compleja para el corte geométrico de las botellas la cual nos eliminará por completo los contaminantes de polietileno y nos podría disminuir el tiempo de lavado en algunas partes de las botellas.

Por el momento no se puede tomar una decisión, ya que no se conoce el efecto que produce el contaminante de polietileno, para tomar una decisión adecuada se procederá a realizar diferentes experimentos que aclaren las dudas anteriores.

Los resultados obtenidos de dichos experimentos así como la evaluación de las propiedades de los diferentes métodos de reciclado se analizan en el Capítulo 5.

3 FUNDAMENTOS TEORICOS

3.1 DETERGENCIA

El término detergencia es empleado en este trabajo como la acción de remover material extraño de la superficie del sólido (plástico) mediante el empleo de surfactantes.

En el caso de las botellas de PVC recuperadas de basureros, el principal contaminante es el aceite residual al cual se aglomeran partículas orgánicas.

Consideremos esquemáticamente el proceso de remoción del contaminante de la superficie del sólido, como la destrucción de la interfase contaminante-sólido y la consecuente formación de las interfases solución acuosa-contaminante y solución acuosa-sólido (vease Figura 3.1).

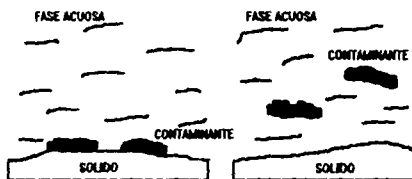


Figura 3.1. Esquemización del proceso de detergencia.

Si la partícula de contaminante está adherida a la superficie por fuerzas de tensión superficial, el cambio en la energía libre de superficie del sistema (G_s) para que ocurra el desprendimiento del contaminante está dado por:

$$G_s = G_{ac} + G_{sa} - G_{sc}$$

donde G representa la energía libre interfacial y los subíndices a , c y s , a la fase acuosa, al contaminante y al sólido respectivamente.

La condición para que el proceso ocurra espontáneamente, es que el cambio de G_g sea menor o igual a cero, lo que implica que:

$$G_{SC} = > G_{ac} + G_{sa}$$

Lo cual indica que es deseable reducir G_{ac} y G_{sa} tanto como sea posible y con un mínimo cambio de G_{SC} , a fin de lograr el desprendimiento del contaminante. De acuerdo a esto, es requerido entonces un surfactante que se adsorba tanto en la interfase contaminante-agua, como en la interfase sólido-agua. Por otro lado, la reducción de la tensión superficial en la interfase agua-aire, no es un indicador directo de que el surfactante actúe como detergente.

Las soluciones de detergentes exhiben por lo general propiedades de electrolitos coloidales, por lo que muchas de sus propiedades físicas (entre ellas la detergencia) cambia bruscamente a una concentración determinada denominada concentración micelar crítica (CMC). La formación de micelas sugiere que la detergencia se realice por la solubilización de las partículas de aceite por las micelas mismas, de tal forma que por arriba de la CMC la detergencia permanezca prácticamente constante.

El problema de detergencia es complejo y depende de un gran número de variables fisicoquímicas y mecánicas que son interdependientes entre sí. Estas variables son:

Fisicoquímicas

- Agente detergente
- Concentración del agente en el medio
- Tiempo de lavado
- Concentración de PVC en el medio
- Temperatura de la solución
- Número de lavados de la solución

Mecánicas

- Tipo de lavadora
- Tipo de agitador
- Velocidad del agitador
- Posición del agitador
- Tamaño de los recortes de PVC

3.2 DESCRIPCION DE LAS VARIABLES FISICOQUIMICAS Y MECANICAS INVOLUCRADAS.

Una vez analizada la necesidad de realizar un lavado termodinámico a las botellas a fin de eliminar los contaminantes que puedan afectar de manera negativa sus propiedades, es necesario hacer un amplio estudio sobre las variables inmersas dentro de un proceso de detergencia, a fin de seleccionar la mejor opción para llevar a cabo el lavado.

A continuación se describen las principales variables que se presentan en un sistema de detergencia de un sólido inmerso en un líquido y el sistema de agitación:

Agente detergente. Cada agente, ya sea jabón, detergentes o tensoactivos, presenta diferentes características de detergencia, así mismo, su disponibilidad, calidad y precio en el mercado es variable, por lo que es necesario hacer un análisis para determinar los más adecuados para trabajar individualmente o mezclados.

Concentración del agente en el medio. El agente detergente baja la tensión superficial del agua con el fin de destruir la interface sólido-contaminante y eliminar los contaminantes de la superficie del sólido. Cada agente detergente, ya sea jabón o tensoactivo, al ir aumentando su concentración en el agua, vá disminuyendo la tensión superficial de la solución, y por lo tanto, aumentando el poder de detergencia de la misma. Esta tensión superficial tiene un valor mínimo, el cual no es posible disminuir, aun cuando se siga aumentando la concentración del agente en el agua. La concentración a la que se alcanza la mínima tensión superficial (concentración micelar crítica ó CMC), es un valor particular para cada agente tensoactivo o detergente. El valor de la CMC nos indica el máximo poder de detergencia que se puede obtener de una mezcla, por lo tanto, al aumentar la concentración del agente en el agua, se estarían aumentando los costos sin obtener beneficio alguno.

Tiempo de lavado. El agente detergente requiere interactuar un cierto tiempo con el sólido para lograr la eliminación de los diferentes contaminantes, cada uno de éstos se comporta de diferente forma, por lo que será necesario determinar el menor tiempo en el que se logre desprender todas las impurezas.

Concentración del PVC en el medio. Dentro de una solución agua-agente, se puede variar el contenido de PVC contaminado a fin de observar la relación solución-PVC óptima para lavar una mayor carga de material con bajo consumo de energía y una mejor detergencia.

Temperatura de la solución. La temperatura de la solución está íntimamente relacionada con el poder de detergencia. La tensión superficial disminuye al aumentar la temperatura del fluido y se requerirá menor energía de movimiento para lograr un desprendimiento de los contaminantes.

Número de lavados de la solución. Con una misma solución agua-agente se pueden realizar lavados a varias muestras logrando una buena detergencia. Al aumentar el número de lavados el fluido se vá contaminando y el poder de limpieza disminuye, por lo que es necesario determinar el máximo número de lavados que nos puede dar una

misma solución sin afectar notablemente la limpieza del producto.

Tipo de lavadora. Es, sin duda, la parte del equipo de agitación más importante para lograr una buena detergencia.

Es necesaria una buena selección y diseño de la lavadora dentro de la cual se va a llevar a cabo el proceso de limpieza, ya que de las dimensiones, geometría, potencia, tipo y accesorios depende el patrón de flujo del fluido, la eficiencia en la detergencia, así como la cantidad de material que puede ser lavado.

Existe una gran variedad de tipos de lavadoras o equipos de agitación por lo que es necesario encontrar el más útil para este propósito.

Tipo de agitador. El agitador es el dispositivo que transforma la energía mecánica proveniente de su eje, en energía cinética del fluido. El poder de limpieza está en función directa del flujo turbulento que se genere dentro de la lavadora, este flujo depende en gran parte del tipo de agitador que le proporciona el movimiento a la solución detergente.

Existen diferentes agitadores que se pueden utilizar para este efecto, y será necesario encontrar el que mejor se adecúe a la solución de este problema, intentando obtener la mayor turbulencia logrando así un óptimo intercambio de momentum y una mejor detergencia; evitando que los recortes de PVC se atoren en el agitador, sin requerir de un excesivo consumo de energía.

Velocidad de agitación. A un mismo agitador se le puede hacer girar a diferentes velocidades angulares, provocando con cada una de éstas, diferentes efectos en la turbulencia y en el intercambio de momentum entre el líquido y los sólidos en suspensión. Los efectos anteriores se reflejan claramente en el consumo de energía del equipo, por lo que es necesario elegir la velocidad óptima para lograr una buena detergencia con bajo consumo de energía.

Posición del agitador. Dentro de una lavadora, la posición del agitador con respecto al eje y al fondo de la lavadora puede variar de gran forma las características del flujo, así como el consumo de potencia y la turbulencia. Con esto se logran diferentes características de detergencia, por lo que se hace necesario el análisis experimental para encontrar la posición más adecuada para las características de limpieza deseadas.

Tamaño de los recortes de PVC. Para lograr un buen lavado, es necesario cortar las botellas, a fin de dejar ambas caras de la película de PVC expuesta al poder detergente de la solución. El tamaño de estos recortes influye en gran forma en la turbulencia que se genera dentro del equipo de lavado, así como en el consumo de energía.

La necesidad de determinar un tamaño de recorte promedio, adecuado para el óptimo funcionamiento del equipo nos conduce a la experimentación con recortes de diferentes tamaños, para esto, las botellas de PVC son cortadas en un molino de cuchillas y pasadas a través de tamices de diferentes características.

3.3 EQUIPOS DE AGITACION

Los líquidos, son generalmente agitados dentro de un tanque o vasija, usualmente cilíndrico con el eje vertical; este tanque puede estar abierto o cerrado por la parte superior. Las dimensiones del tanque varían, de acuerdo a la naturaleza del problema de agitación.

La potencia se transmite por un motor eléctrico a través del eje del agitador, el cual puede estar conectado directamente o bien, a través de un reductor de velocidad.

El impulsor crea un patrón de flujo en el sistema, logrando que el líquido circule a través del tanque y regrese eventualmente al agitador.

3.3.1 Agitadores

El flujo que se genera por los agitadores puede ser de dos tipos fundamentalmente: corrientes paralelas al eje del agitador (agitadores de flujo axial) y corrientes en dirección radial o tangencial (agitadores de flujo radial).

Los tres principales grupos de agitadores son: propelas, de paletas y turbinas. Cada grupo contiene muchas variaciones y subdivisiones. Existen agitadores especiales que pueden ser útiles en casos particulares, pero estos tres tipos resuelven el 95% de los problemas de agitación.

Propelas. Una propela es un agitador de tipo marino, de flujo axial, de alta velocidad y para líquidos de baja viscosidad. Las propelas pequeñas trabajan a altas velocidades de hasta 1750 rpm. Las corrientes que generan estos agitadores continúan del agitador hacia una dirección dada, hasta que rebotan en las paredes o en el fondo del recipiente.

Agitador de paletas. Generalmente formados por paletas planas girando en un eje vertical, de flujo radial y de baja velocidad. Algunas veces las paletas se inclinan para generar flujo axial.

A bajas velocidades las paletas logran buena agitación sin requerir la adición de baffles, a altas velocidades los baffles se hacen necesarios.

Turbinas. La mayoría de estos agitadores están formados por varias paletas de pequeñas dimensiones, girando a altas velocidades en el centro del recipiente.

Las paletas pueden ser rectas o curvas, verticales o inclinadas, generando flujos axiales y radiales, las componentes tangenciales inducen la formación de vórtices o remolinos, los cuales deben detenerse con la adición de baffles o algún otro dispositivo. Las turbinas son efectivas en líquidos con un gran rango de viscosidades.

El patrón de flujo en un equipo de agitación depende del tipo de agitador, de las características del fluido y del tamaño y proporciones del tanque, del agitador y de los accesorios.

La velocidad en el fluido en cualquier punto del tanque tiene tres componentes, el patrón de flujo en el tanque depende de las variaciones de punto a punto de estas tres componentes de velocidad. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del agitador, la segunda componente es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje y la tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangente a un círculo alrededor del eje del agitador.

Las componentes radiales y tangenciales son necesarias para generar el patrón de flujo para una buena agitación y mezclado.

Los agitadores tipo propela se utilizan cuando se desean fuertes corrientes verticales, mientras que los agitadores de paletas generan un buen flujo radial, pero con bajas corrientes verticales. Los agitadores tipo turbina generan flujos radiales y tangenciales, son excelentes para el mezclado con fuerte agitación [15].

3.3.2 Análisis teórico del consumo de potencia en equipos de agitación

Una consideración importante en el diseño de un equipo de agitación, es la potencia requerida para mover el agitador. Este requerimiento de potencia no puede ser estimado teóricamente, aun en los más simples sistemas de agitación. La potencia consumida por el motor está en función de variables como: la viscosidad del líquido, la densidad del mismo, las revoluciones por minuto del agitador, el tipo de agitador, el diámetro del agitador, las dimensiones del tanque, etc. [15].

Se han realizado estudios experimentales en los que se correlaciona la potencia con parámetros adimensionales de flujo (número de Reynolds, número de Freud y número de potencia adimensional) en agitadores específicos, obteniéndose gráficas, que permiten hacer un cálculo aproximado del consumo de potencia [16].

Cuando se trabaja con líquidos no newtonianos, la potencia se calcula con los mismos parámetros adimensionales, pero debido a la viscosidad aparente de los fluidos, el número de Reynolds es difícil de evaluar. En algunos casos se utiliza un promedio de viscosidad aparente, encontrando curvas de correlación para líquidos de estas características, obteniéndose resultados aun más alejados de la realidad.

Un gran problema en el diseño de agitadores, es la proyección a partir de los resultados obtenidos en el laboratorio a una planta piloto o a una unidad industrial. Aun cuando se logran similitudes geométricas, las similitudes cinemáticas y dinámicas no se dan. Por lo que se dificulta aun más la proyección. Como en la mayoría de los problemas de ingeniería, el diseñador debe basarse en su criterio y experiencia [15].

Basados en el razonamiento de que un alto consumo de potencia implica un alto grado de turbulencia y un alto grado de turbulencia una mejor agitación, los experimentos se pueden avocar a la medición de potencia, con el fin de evaluar la agitación.

4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para lograr un análisis adecuado de la metodología óptima de reciclado así como para una correcta evaluación de las diferentes opciones de reciclado, se desarrolló un diseño experimental, el cual está formado por tres actividades principales: en la primera se realiza el análisis experimental sobre la detergencia, con el fin de encontrar el equipo y las condiciones óptimas para un eficiente lavado del PVC. La segunda actividad se avoca a la extrusión y preparación de muestras procedentes de material recuperado con diferentes características, a fin de evaluar las propiedades del producto reciclado. La última actividad se concreta al análisis de las propiedades mecánicas de los diferentes productos reciclados.

4.1 ANALISIS EXPERIMENTAL MODIFICANDO LAS VARIABLES INMERSAS EN LA DETERGENCIA

Una vez descritas las variables fisicoquímicas y mecánicas para la detergencia, se realizó el análisis experimental de dichas variables tanto a nivel laboratorio y planta piloto.

4.1.1 Experimentación en el laboratorio

1.- Evaluación de agentes deterсивos.

Realizando un trabajo de campo previo a la experimentación, donde se seleccionaron diferentes agentes, se procedió a la evaluación de ellos, los cuales fueron clasificados dentro de tres grupos en función del tipo de agente, mismos que se mencionan adelante. Cabe señalar que la sosa cáustica, no es un agente deterсивo, pero dado que reacciona químicamente con las grasas y aceites para formar jabones, se utilizó como agente detergente.

- a) Detergentes comerciales: Foca, Ariel, Roma, marca libre.
- b) Agentes tensoactivos iónicos: Canasol NF-500, Canasol NF-1000.
- c) Sosa cáustica.

La experimentación consiste primero en determinar la CMC de cada uno de los agentes por medio del método del doble capilar y del tensiómetro de Du Nouy. A partir de las curvas concentración del agente contra la tensión superficial de la solución, se obtiene la CMC, tal y como se observa en la Figura 4.1.

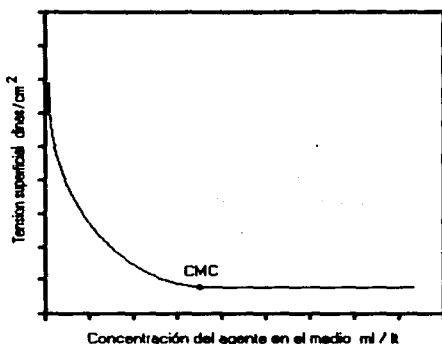


Figura 4.1. Curva típica de tensión superficial contra concentración del agente.

2.- Evaluación de la detergencia.

En un arreglo como el mostrado en la Figura 4.2, consistente en un agitador tipo propela girando a 1300 rpm y un vaso de precipitados de 1000 ml, se realizaron pruebas de detergencia con los agentes seleccionados anteriormente, formando la solución con la CMC en 800 ml de agua, variando el tiempo de agitación, la concentración de PVC en la solución y la temperatura de la solución.

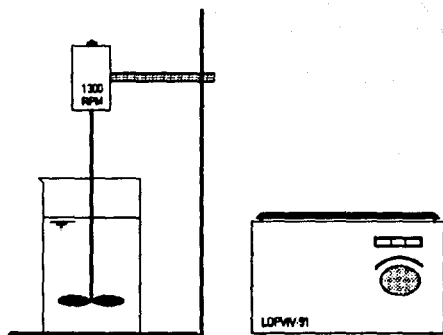


Figura 4.2. Arreglo para lavado en el laboratorio.

Para evaluar el poder detergente de cada uno de los agentes se utilizó la ecuación (1) se analizó la calidad del producto lavado.

$$\% \text{ Det} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

% Det relación peso perdido/peso inicial

m_i peso del PVC sucio

m_f peso del PVC limpio y seco

4.1.2 Experimentación en planta piloto

Esencialmente esta experimentación se dividió en dos partes:

1.- Análisis de variables mecánicas.

En esta parte de la experimentación se analizan las variables mecánicas como: tipo de lavadora, tipo de agitador, velocidad de agitación, posición del agitador dentro de la lavadora y tamaño de los recortes de PVC.

2.- Implantación de los resultados obtenidos a nivel planta piloto.

En esta parte de la experimentación, se evalúa la veracidad de los resultados, haciendo pruebas en un equipo como el mostrado en la Figura 4.3, consistente en un tanque de 500 lt y agitadores tipo turbina impulsados por un motor de 1 hp.

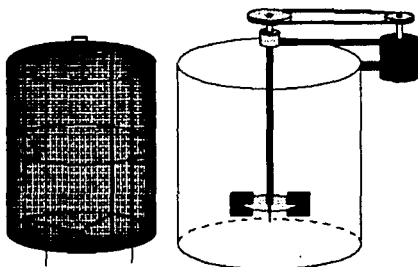


Figura 4.3. Lavadora planta piloto.

4.2 METODOS PARA PREPARACION DE MUESTRAS

4.2.1 Separación de muestras

A fin de evaluar las propiedades del producto recuperado en función de la composición del lote reciclado, se sometieron al proceso de recuperación y de lavado cinco grupos de muestras:

- a) La primera constituida por botellas de aceite comestible de la marca 123, es decir por botellas de PVC.
- b) La segunda formada por botellas de aceite comestible de diferentes marcas, siendo todas ellas de PVC.
- c) La tercera constituida por botellas de aceite comestible de PVC de la marca 123, incluyendo la tapadera y la válvula de polietileno.
- d) La cuarta formada por botellas de aceite comestible de diferentes marcas, siendo todas ellas de PVC, incluyendo la tapadera y la válvula de polietileno.
- e) La quinta formada por material sin seleccionar, que incluye botellas de PET y exento de polietileno.

4.2.2 Preparación de muestras

Una vez limpias y secas las muestras, son pasadas a través de un molino de cuchillas, provisto de un tamiz con agujeros de 6 mm de diámetro. Las muestras de material sin seleccionar son molidas nuevamente a fin de obtener un tamaño de partícula más fina, ya que debido a la incompatibilidad de los polímeros, el PET debe actuar como carga.

Como parámetro de comparación se extruye una muestra de PVC proveniente de desecho industrial, color café.

La formación de láminas de las muestras se realiza en un extrusor "HAAKE" acoplado a un sistema de calandreo. Las condiciones de extrusión son: perfil de temperaturas 190-190-200-200°C, y velocidad angular del husillo de 64 rpm. El sistema de calandreo está formado por tres rodillos ajustables provistos de un sistema de refrigeración con agua.

Todas las láminas se forman bajo las mismas condiciones de operación, algunas de ellas se lubrican con cera al 0.5% a fin de facilitar su extrusión. Los diferentes tipos se enuncian en la siguiente lista:

TIPO	COMPOSICION		
A	PVC 123	sin polietileno	sin cera
B	PVC 123	con polietileno	sin cera
C	PVC diferentes marcas	con polietileno	con cera
D	PVC diferentes marcas	con polietileno	sin cera
E	PVC diferentes marcas	sin polietileno	con cera
F	PVC diferentes marcas	sin polietileno	sin cera
G	PVC y PET diferentes marcas	sin polietileno	con cera
H	PVC y PET diferentes marcas	sin polietileno	sin cera
I	PVC proveniente de desecho Industrial		

4.3 METODOS DE ENSAYO PARA EVALUACION DE PROPIEDADES

Con las láminas de cada muestra se procede a realizar evaluaciones de apariencia física y propiedades mecánicas.

La evaluación de la apariencia del producto, se basa en una detallada observación de la superficie, el color y la opacidad.

La evaluación de las propiedades mecánicas, se concretan a determinar: módulo de elasticidad, resistencia a la tensión y resistencia a la fractura, ensayadas mediante pruebas de tracción, de acuerdo a la Norma ASTM D-638. Las probetas ensayadas se muestran en la Figura 4.4.

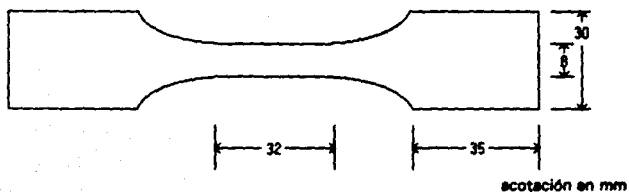


Figura 4.4. Probeta para tensión.

Las pruebas mecánicas se realizan en el equipo INSTRON del laboratorio de pruebas mecánicas del Instituto de Investigación en Materiales, con una velocidad del cabezal de 5 mm/min (según recomendaciones de ASTM para PVC rígido).

5 RESULTADOS Y DISCUSION

Composición de las botellas procedentes del basurero.

Como una primera evaluación, se determinó el porcentaje en peso de polietileno que contienen las botellas provenientes del basurero, a partir de un lote con un peso total de 4.217 kg., encontrándose 0.125 kg de polietileno, lo cual representa un 2.96% del peso total. En esta evaluación se incluyeron botellas tanto de PVC como de PET.

5.1 ANALISIS EXPERIMENTAL MODIFICANDO LAS VARIABLES INMERSAS EN LA DETERGENCIA

5.1.1 Experimentación en el laboratorio

En esta etapa, se evalúa el efecto de las diversas variables involucradas en el proceso de detergencia sobre lotes de botellas no seleccionadas, es decir, tal y como provienen del basurero.

1.- Evaluación de agentes deterstivos.

Los resultados obtenidos durante esta parte de la experimentación se muestran en la Tabla 5.1. A fin de evaluar y seleccionar el agente óptimo, considerando su eficiencia y costo, se empleó un factor de abatimiento de tensión x costo de la solución. El mínimo valor de este factor indica un máximo abatimiento de tensión superficial a bajo costo, haciendo el proceso de lavado más eficiente. En este caso se le da la misma importancia al abatimiento de tensión superficial y al costo de la solución. Como se puede observar el tensoactivo Canasol NF- 1000 tiene un factor de 17.3, el cual está muy por debajo de los factores de los otros agentes, disminuyendo la tensión superficial de la mezcla a 32.0 dinas/cm con un costo de \$0.54 por litro de solución. Esto indica que tiene un alto poder de detergencia y un muy bajo costo.

Para el caso particular de la sosa, no existe una CMC, ya que por el contrario, la sosa incrementa la tensión superficial del agua, sin embargo, como se mencionó anteriormente, la sosa reacciona con las grasas y aceites formando jabones (saponificación), lo cual se refleja en el abatimiento de la tensión superficial de la solución que contiene el PVC que se desea lavar. La concentración empleada en los lavados, de sosa al 50%, fué seleccionada en base a la literatura sobre saponificación.

Tabla 5.1. Comportamiento y costo de agentes detergentes.

AGENTE	CMC gr/lt	C. AG \$/kg	C. SOL \$/ft	TEN din/cm	TEN x C.SOL din \$/ft cm
ARIEL	8	3,150	25.2	26.5	667.8
MARCA LIBRE	3	2,524	7.57	34.0	257.4
ROMA	7	2,850	19.95	30.0	598.5
FOCA	4	3,150	12.6	40.0	504.0
* NaOH 50%	10	1,100	11.0	32.0	352.0
* CANASOL NF-500	0.8	6,690	4.95	28.0	138.6
* CANASOL NF-1000	0.1	5,460	0.54	35	18.9

- * Tensión superficial de la sosa después de varios lavados
- * CMC en ml/ft

CMC. concentración micelar crítica
 C. AG. costo del agente
 C. SOL. costo de la solución
 TEN tensión superficial
 TEN x C. SOL. factor abatimiento de tensión x costo de la solución

2.- Evaluación de la detergencia.

Una vez determinado el agente detergente de mayor eficiencia de abatimiento de tensión superficial y costo (Canasol NF-1000), se procede al estudio del resto de las variables involucradas en el proceso de detergencia.

a) Efecto del tiempo de lavado.

Manteniendo constante la concentración del agente tensoactivo (CMC), la concentración de PVC en la solución (20 gr/800 ml de agua) y la temperatura (temperatura ambiente) se analizó el efecto del tiempo de agitación o lavado.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.2, en los que se puede observar que con un tiempo de agitación de 10 minutos la detergencia es del 7.1% y la relación %detergencia/tiempo es de 0.71. A partir de este momento la detergencia se incrementa ligeramente con el tiempo, pero la relación %detergencia/tiempo decae bruscamente.

Tabla 5.2. Efecto del tiempo de lavado en la detergencia manteniendo constante la temperatura de la solución 20°C.

AGENTE	CMC ml/lt	PVC g	TIEMPO min	% DET	%DET/TIEMPO
CANASOL NF-1000	0.1	20	5	3.1	0.62
"	"	"	7	4.7	0.67
"	"	"	10	7.1	0.71
"	"	"	12	7.3	0.60

b) Efecto de la concentración de PVC en la solución.

Tomando en cuenta el tiempo de agitación óptimo (10 min) de la prueba anterior y manteniendo constante la concentración del agente y la temperatura, se varió la concentración de PVC de 20 a 50 gramos, como se muestra en la Tabla 5.3.

Los resultados muestran que con una carga de 30 gr la detergencia es de 6.9% y la relación %detergencia/gr de PVC es de 0.23. Al ir aumentando la carga la relación %detergencia/gr de PVC disminuye considerablemente.

Tabla 5.3. Efecto de la concentración de PVC en la solución manteniendo constante la temperatura .

AGENTE	CMC ml/lt	PVC g	TIEMPO min	% DET	%DET/PVC
CANASOL NF-1000	0.1	20	10	7.1	0.35
"	"	30	"	6.9	0.23
"	"	40	"	4.5	0.11
"	"	50	"	2.9	0.05

c) Efecto de la temperatura de la solución

Una vez determinado el poder detergente de la solución a temperatura ambiente (6.9), es necesario evaluar el mismo en función del incremento de temperatura, manteniendo constante la concentración del agente tensoactivo (CMC), la concentración de PVC en la solución (20 gr/800 ml de agua) y el tiempo de agitación (10 min).

La temperatura de la solución se varió en incrementos de 10°C a partir de los 20°C hasta los 60°C. La evaluación del efecto que produce la temperatura en la detergencia, se realiza en este caso empleando la relación incremento de detergencia/incremento de temperatura (1%det/1°C).

Los experimentos muestran un aumento en el porcentaje de detergencia con el aumento de la temperatura. Sin embargo, el incremento de detergencia es muy pequeño con relación al incremento de la temperatura, por lo que la mencionada relación disminuye drásticamente. Los resultados se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Efecto de la temperatura de la solución manteniendo constantes el resto de los parámetros.

AGENTE	TEMP °C	I TEMP °C	% DET	I % DET	I %DET/ I °C
CANASOL NF-1000	30	10	7.1	0.2	0.02
"	40	20	7.2	0.3	0.015
"	50	30	7.3	0.4	0.013
"	60	40	7.3	0.4	0.01

d) Efecto del número de lavados de la solución

Considerando el valor óptimo de cada variable y con cada uno de los agentes seleccionados se analizó la cantidad de lavados posible con una misma solución.

Los resultados experimentales presentados en la Tabla 5.5 muestran como la misma solución puede utilizarse eficazmente para 14 ó 15 lavados quedando dentro de un rango de eficiencia aceptable (mayor al 90%). A partir del lavado número 16 el porcentaje de detergencia comienza a bajar bruscamente disminuyendo la eficiencia hasta un 78.2%.

Tabla 5.5. Efecto del número de lavados de la solución con todos los parámetros constantes.

# lav	AGENTE	CMC ml/lt	PVC g	TIEMPO min	% DET	% EFICIENCIA
1	CANASOL NF-1000	0.1	30	10	6.9	100.0
2	"	"	"	"	6.9	100.0
...						
...						
15	"	"	"	"	6.3	91.3
16	"	"	"	"	5.4	78.2

5.1.2 Experimentación en planta piloto

Al igual que en la experimentación de laboratorio, las botellas empleadas en esta etapa, no son seleccionadas previamente.

1.- Análisis de variables mecánicas.

En esta parte de la experimentación se analizaron variables mecánicas como: tipo de lavadora, tipo de agitador, velocidad de agitación, posición del agitador dentro de la lavadora y tamaño de los recortes de PVC.

a) Tipo de lavadora.

Se experimentó fundamentalmente con un tipo de lavadora, la cual, como en la mayoría de los casos, consta de un tanque cilíndrico con el eje vertical, en cuyo interior se realiza la agitación de los fluidos. Las dimensiones del tanque varían, de acuerdo a la naturaleza del problema de agitación.

Generalmente este tipo de lavadora, requiere la adición de baffles en la periferia con el fin de aumentar la turbulencia, con la consecuente disminución de remolinos o vórtices.

Para este caso particular, en el que se trata un sistema de sólidos suspendidos o dispersados en un fluido, y que se requiere de la separación posterior de éstos, se hace necesario el uso de una canasta de malla para lograr dicho propósito. De esta forma, el plástico a lavar, se deposita dentro de la canasta, con el fin de que al sacar ésta de la lavadora se separe el plástico de la solución.

Además, la canasta provoca el mismo efecto que la adición de baffles, lo que hace innecesario el uso de éstos.

b) Tipo de agitador.

Recurriendo a la literatura, se encontró diversidad de agitadores, que provocan diferentes efectos mecánicos sobre el tipo de fluido a agitar. Para este problema donde se trata de un fluido con sólidos en suspensión, el agitador más conveniente es el tipo turbina, como el mostrado en la Figura 5.1, el cual puede diferir en cuanto al número de paletas y al ángulo de inclinación de éstas con respecto al eje de la turbina.

Los agitadores probados se señalan con un código de dos números, el primero de ellos indica el número de paletas y el segundo el ángulo de inclinación de éstas respecto al eje del agitador. Estos agitadores tienen un diámetro de 9 cm, el diámetro del eje es de 1 cm y las paletas miden 4 cm por lado.

Los agitadores probados fueron: agitador 4-45 (4 aspas a 45°), agitador 4-30, agitador 3-45, agitador 2-45 y agitador 2-0.

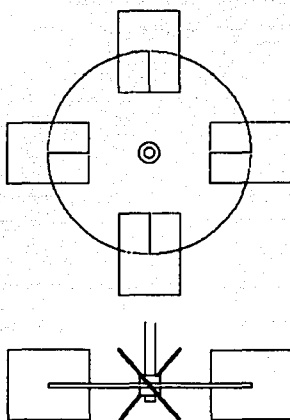


Figura 5.1. Agitador tipo turbina.

c) Velocidad de agitación y posición del agitador dentro de la lavadora en función de la carga de material.

Los agitadores se ensayaron empleando un taladro vertical de cabeza engranada de 1 hp, y utilizando un recipiente cilíndrico de aproximadamente 11 lt. Durante las pruebas se varió la concentración de PVC en la solución partiendo de 200 gr en incrementos de 120 gramos a tres diferentes velocidades (225, 740 y 1080 rpm), esto con el fin de observar los efectos provocados en el fluido al variar la velocidad de agitación y la concentración del PVC en la solución con cada uno de los agitadores.

Durante el desarrollo de estas pruebas se evaluó el consumo de energía del taladro al variar los parámetros antes mencionados y la posición de cada agitador con respecto al fondo del recipiente. Se experimentó con cinco posiciones diferentes principiando por el fondo del tanque.

De igual forma se verificó el consumo de energía del taladro a todas las velocidades: 85, 170, 225, 370, 450, 540, 740 y 1080 rpm. Trabajando en vacío y con la máxima carga (320 g).

De los resultados obtenidos, mismos que se reportan en el Apéndice C, se derivan dos observaciones relevantes: la primera, que la diferencia de la potencia consumida por cada tipo de agitador en función del número de revoluciones del agitador es poco significativa, tal y como se observa en las Figura 5.2.

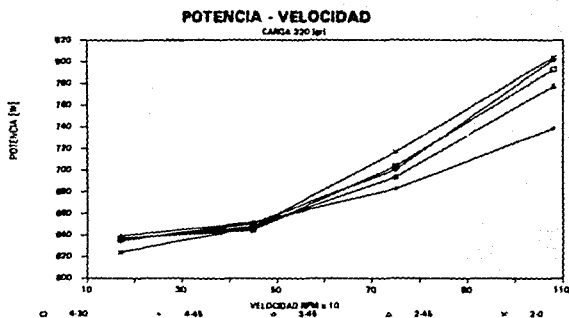


Figura 5.2. Consumo de potencia en función del número de revoluciones para los diferentes agitadores.

Por otro lado, la diferencia que existe en el consumo de energía eléctrica a las diferentes velocidades en relación al incremento de carga, resulta ser pequeña, tal y como se observa en la Figura 5.3. Este pequeño incremento de potencia (diferencia de potencia entre agitador trabajando con carga y trabajando en vacío) es la que absorbe el fluido.

La potencia consumida por los agitadores trabajando en vacío, corresponde prácticamente a las pérdidas mecánicas.

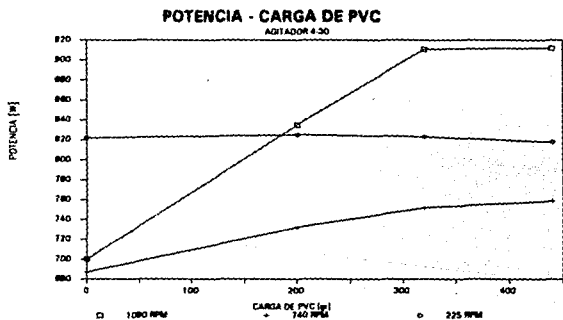


Figura 5.3. Consumo de energía en función de la carga de PVC.

Basados además en las observaciones y limpieza lograda del PVC, resulta recomendable realizar el lavado a la mayor velocidad que soporte el equipo de agitación. De hecho se puede decir que a mayor turbulencia el proceso de limpieza es más eficiente.

Respecto a la posición del agitador en el tanque, se observa una mayor turbulencia cuando el agitador se encuentra colocado a una distancia de $2/5$ de la altura del tanque.

d) tamaño de los recortes de PVC

Analizando estudios anteriores referentes al efecto que provoca el tamaño de partículas sólidas sometidas a un lavado de este tipo, se encontró que las partículas son lavadas eficazmente si el tamaño de las muestras se encuentra dentro de un rango de 9 a 25 cm^3 por lo que se utilizó un tamiz con agujeros de 6 x 7 cm al cortar las botellas de PVC, obteniéndose muestras de tamaños apropiados.

Con los resultados obtenidos en base al consumo de energía y a efectos provocados sobre el fluido, se fijaron los siguientes parámetros: velocidad de agitación, posición del agitador, tipo de lavadora y tipo de agitadores; los cuales junto con los obtenidos a nivel laboratorio se proyectan a un equipo de lavado de mayor capacidad.

2.- Implantación de los resultados obtenidos a nivel planta piloto.

Los resultados arrojados durante esta prueba permiten obtener los parámetros óptimos para la detergencia del PVC a nivel industrial.

Con la CMC de cada uno de los agentes seleccionados para formar la solución, se efectuaron pruebas, variando la concentración de PVC y el tiempo de agitación a temperatura ambiente.

En estas pruebas, el poder detergente no se pudo evaluar conforme a la ecuación (1), debido a que parte del material queda atrapado en las canastas, perdiendo la veracidad de los resultados. Por lo tanto, este poder detergente tuvo que ser analizado mediante observación.

En cuanto a la concentración de PVC en la solución, ésta fue aumentado en incrementos de 500 gramos a partir de un kilogramo, evaluando la energía consumida por el motor de la lavadora, hasta encontrar la concentración de PVC relacionada con un bajo consumo de energía.

En las últimas pruebas realizadas, se matuvieron fijos todos los parámetros con el fin de evaluar mezclas de los diferentes agentes detergentes en la solución.

Como resultado de estos ensayos, se seleccionó una mezcla de tensoactivos con sosa cáustica, la cual funciona de una manera compleja. El agente tensoactivo abate la tensión superficial inicialmente, mientras que la sosa la incrementa. Sin embargo, la sosa al reaccionar con los aceites o grasas desprendidas por el agente tensoactivo, genera jabón, lo cual contribuye a mantener un nivel prácticamente constante de agente tensoactivo en la solución incrementando la eficiencia de los lavados.

La utilización de la sosa tiene además la ventaja de incrementar la temperatura de la solución, la cual es un factor íntimamente ligado con el poder detergente de la solución. La reacción de la sosa, junto con la agitación, incrementa la temperatura de la solución, alcanzando una temperatura de 36 °C después de la séptima lavada.

En la tabla 5.6 se muestra una síntesis de los resultados para lograr una óptima detergencia del material.

Tabla 5.6. Resultados para la óptima detergencia del PVC.

Agente detergente	sosa cáustica + Canasol NF-1000
Concentración del agente en el medio	10 gr sosa cáustica/ft agua 0.1 ml Canasol NF-1000/ft agua
Tiempo de lavado	10 minutos
Concentración de PVC en el medio	de 20 a 40 gr/ft dependiendo de la potencia del motor
Temperatura de la solución	ambiente
Número de lavados de la solución	15
Tipo de lavadora	tanque cilíndrico vertical, sin baffles, canasta de malla para retención del PVC
Tipo de agitador	turbina de 2 a 4 paletas a 60 ó 45°
Velocidad de agitación	mayor a 700 rpm, se recomienda la mayor velocidad que soporte el equipo
Posición del agitador	de 2/5 a 1/3 de la altura, respecto al fondo de la canasta
Tamaño del PVC	cortado y pasado a través de un tamiz con agujeros de 6 x 7 cm

5.2 EFECTO DEL TIPO DE MUESTRA EN LA APARIENCIA FISICA DEL PRODUCTO RECICLADO

La apariencia física es muy importante tomando en cuenta que con estos materiales reciclados se pueden fabricar artículos que estén en contacto con el ser humano. En esta parte se determinan las características de textura y apariencia física de cada tipo de muestra. La Tabla 5.7 presenta las diferentes características de cada uno de estos productos.

El material reciclado de una sola marca (123) presenta superficie fibrosa, un color amarillo claro cuando no contiene el contaminante de polietileno (tipo A) y un color rojizo cuando lo contiene (tipo B, las tapaderas de la marca 123 son rojas); se observa que los materiales mezclados reciclados con el contaminante de polietileno presentan una superficie gruesa translúcida (tipos C y D); mientras que el material mezclado sin polietileno presenta la mejor superficie, siendo ésta continua, de color amarillo claro y semitransparente (tipos E y F). Los materiales reciclados mezclados con PET presentan las mismas características de apariencia que los anteriores con incrustaciones de PET (tipos G y H). Las láminas tipo I funcionan como parámetro de comparación.

Tabla 5.7. Apariencia física de los diferentes materiales reciclados.

TIPO	OBSERVACIONES	
A	superficie fibrosa, color amarillo claro, translúcido	
B	superficie fibrosa, color rojizo, translúcido	
C	superficie gruesa, color amarillo claro, translúcido	
D	superficie gruesa, color amarillo claro, translúcido	
E	superficie continua, color amarillo claro, semitransparente	
F	superficie continua, color amarillo claro, semitransparente	
G	superficie continua con partículas sólidas de PET, color amarillo claro, semitransparente	
H	superficie continua con partículas sólidas de PET, color amarillo claro, semitransparente	
I	superficie continua, color café, translúcido	

A	PVC 123	sin polietileno	sin cera
B	PVC 123	con polietileno	sin cera
C	PVC diferentes marcas	con polietileno	con cera
D	PVC diferentes marcas	con polietileno	sin cera
E	PVC diferentes marcas	sin polietileno	con cera
F	PVC diferentes marcas	sin polietileno	sin cera
G	PVC y PET diferentes marcas	sin polietileno	con cera
H	PVC y PET diferentes marcas	sin polietileno	sin cera
I	PVC proveniente de desecho Industrial		

5.3 EFECTO DEL TIPO DE MUESTRA EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL PRODUCTO RECICLADO

Se ensayaron un total de 55 probetas de los diferentes materiales, obteniéndose propiedades mecánicas en base a un promedio aritmético del total de probetas del mismo tipo. Los resultados de esta parte de la experimentación se muestran en la Tabla 5.8.

Los módulos de elasticidad de las diferentes muestras presentan valores próximos, a excepción de las que contienen las inclusiones de PET, en las cuales aumenta en gran medida el módulo de elasticidad.

En cuanto a la resistencia a la fractura y la resistencia a la tensión de las diferentes muestras, prácticamente exhiben los mismos valores, observándose una ligera disminución de la resistencia a la tensión en las probetas que contienen las inclusiones de PET (G y H).

Tabla 5.8. Propiedades mecánicas de las probetas de PVC.

TIPO	AREA TANS mm ²	MOD ELAS kg/cm ²	DEFOR ELAS	RESIS TENS kg/cm ²	DEFOR TENS	RESIS FRAC kg/cm ²	DEFOR FRAC
A	8.8	684	0.029	386	0.063	317	0.408
desv st	0.1	15	0.001	19	0.006	18	0.008
B	10.4	830	0.024	391	0.064	325	0.461
desv st	1.1	90	0.003	18	0.006	52	0.005
C	11.0	881	0.023	361	0.057	339	0.087
desv st	0.6	63	0.002	12	0.001	49	0.003
D	9.4	810	0.025	373	0.057	351	0.173
desv st	0.6	35	0.001	29	0.002	30	0.003
E	10.8	838	0.024	384	0.067	321	0.535
desv st	0.8	54	0.001	21	0.002	17	0.003
F	10.4	834	0.024	398	0.064	328	0.497
desv st	1.1	124	0.003	11	0.004	12	0.004
G	14.4	1257	0.016	343	0.057	343	0.065
desv st	1.7	83	0.001	43	0.004	43	0.002
H	15.6	1271	0.016	300	0.048	300	0.049
desv st	1.5	213	0.001	20	0.006	20	0.008
I	9.3	961	0.021	437	0.058	382	0.613
desv st	0.4	33	0.001	10	0.002	12	0.120

A PVC 123

B PVC 123

C PVC diferentes marcas

D PVC diferentes marcas

E PVC diferentes marcas

F PVC diferentes marcas

G PVC y PET diferentes marcas

H PVC y PET diferentes marcas

I PVC proveniente de desecho Industrial

sin polietileno sin cera

con polietileno sin cera

con polietileno con cera

con polietileno sin cera

sin polietileno con cera

sin polietileno sin cera

sin polietileno con cera

sin polietileno sin cera

En las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran las gráficas que comparan el módulo de elasticidad, la resistencia a la tensión y la resistencia a la fractura de los diferentes tipos de probetas.

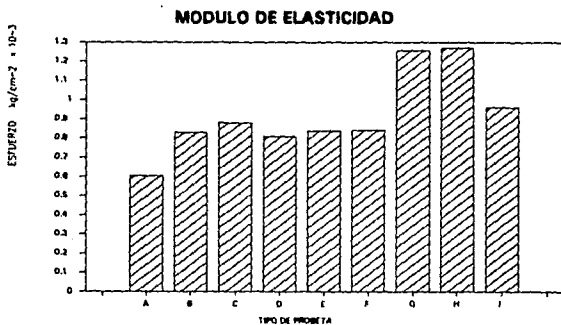


Figura 5.4.

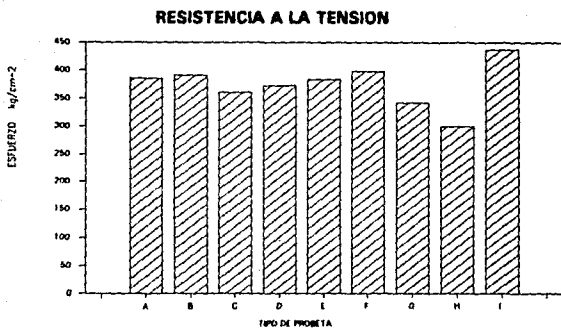


Figura 5.5.

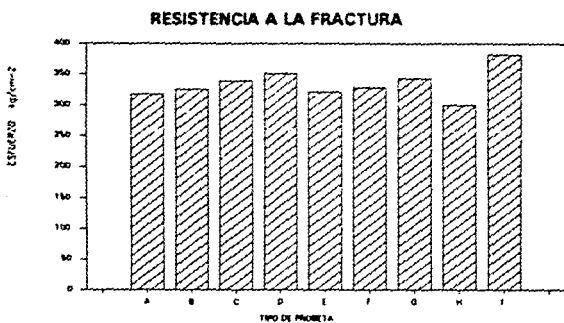


Figura 5.6.

6 APLICACION DE LOS DIFERENTES MATERIALES RECICLADOS

Dado que los productos manufacturados con materiales reciclados exhiben características y propiedades inferiores que las de los fabricados con las resinas vírgenes, se reducen sus posibilidades de aplicación. Sin embargo, los plásticos reciclados tienen un amplio mercado en artículos donde la baja resistencia mecánica puede ser aceptada y los estándares de apariencia y funcionalidad no son esenciales.

Aunado lo anterior a las razones mencionadas en el primer capítulo de este estudio, como son el bajo costo de los materiales reciclados así como la necesidad de evitar en todo lo posible la generación de basura y darle un valor agregado a los desechos plásticos, estos materiales resultan potencialmente atractivos desde el punto de vista económico.

Como en el caso de la mayoría de los polímeros, la variedad de productos que pueden ser manufacturados con plásticos reciclados depende de la imaginación del ser humano y de las limitantes propias del material.

6.1 LIMITANTES DEL REPROCESADO DEL PVC

Las temperaturas del proceso cercanas a los 200°C, destruyen la mayoría de los residuos alimenticios y bacteriológicos, pero las altas temperaturas necesarias para esterilizar el material degradan al PVC. Debido a la absorción de contaminantes residuales dentro de su estructura, los plásticos reciclados provenientes de la basura, por razones de sanidad, no deben estar en contacto directo con agua potable, medicamentos o alimentos.

El PVC tiende a descomponerse durante el proceso de extrusión, liberando ácido clorhídrico, por lo que es necesaria la adición de estabilizantes al calor.

El PVC se degrada muy rápidamente por los efectos de los rayos ultravioleta provenientes del sol, por lo que su aplicación se enfocará principalmente a artículos que no estén expuestos a la luz directa del sol ni a la intemperie, lo que nos limita en las aplicaciones del material. En caso de requerimientos de uso externo se le pueden añadir estabilizantes contra la luz ultravioleta evitando la degradación del PVC.

El material recuperado puede ser conformado por los diferentes procesos comunes en la manufactura de productos plásticos como son: Inyección, extrusión, soplado y calandrado.

6.2 POSIBILIDADES DEL PVC RECICLADO

Los tres grupos de materiales reciclados obtenidos en este trabajo presentan diferentes características, y por lo tanto pueden tener distintas aplicaciones. Las aplicaciones posibles para ellos son las siguientes:

PVC puro. Como se aprecia en el Capítulo 5, este material por sus características de apariencia y de resistencia mecánica es el más útil y aplicable a artículos de mejor calidad que estén en contacto con el ser humano. Entre estos artículos se podrían nombrar los siguientes:

- Botellas para envasar diferentes productos como: solventes, aceites lubricantes, gasolinas, artículos de limpieza, pinturas, pegamentos, etc.

- Perfiles estructurales: ventanas internas para oficinas, plafones, etc.

- Artículos de oficina y escolares: reglas, plumas, separadores, contenedores, etc.

PVC con polietileno. La resistencia mecánica de este producto es aceptable, pero su apariencia no tiene la calidad de la del PVC puro, lo que limita su uso. La adición de colorantes mejora notablemente la apariencia de este material lo que amplía el mercado de productos con estas características. De este material se pueden manufacturar diversidad de artículos entre otros:

- Substitutos de piezas de ferretería: tornillos, clavos, pijas, taquetes, arandelas, chavetas, manijas, agarraderas, etc.

- Herramientas y mangos de herramientas: llaves españolas, llaves inglesas, mangos de desarmadores, mangos de pinzas, etc.

- Tubería para líquidos no potables: desagües, agua de riego, aguas negras, tuberías para acuarios, juntas para tubería, etc.

- Fibras: relleno de bolsas de dormir, chamarras, almohadas, aislantes térmicos, fibras para cordones, cepillos, escobas, etc.

- Otros: piezas para mecanismos, coladeras para baños, juguetes, ruedas, ganchos para ropa, cascos industriales, cinta para fleje, estacas, varillas estructurales, etc.

PVC con PET. La resistencia mecánica es baja y la apariencia no es muy aceptable, sin embargo, este producto puede tener una infinidad de aplicaciones donde no se requieran de estas características. El PVC con PET puede mejorar su apariencia por medio de colorantes, cubriéndolo con películas de otro material o con pinturas exteriores. Algunos productos que se pueden fabricar con este material son:

- Piezas para construcción: láminas para plafones falsos, pisos, losetas, perfiles, mamparas para urinarios, etc.

- Artículos para el hogar: cubetas, macetas, botes de basura, recojedores, palos de escoba, etc.

- Productos para agricultura y ganadería: varales para agricultura, vallas, bebederos para animales, recubrimiento para paredes de granjas, recubrimiento de establos, etc.

- Mangos de herramientas de baja calidad: mangos de cepillos, mangos de brochas de pintor, etc.

- Placas de diversos usos: losetas para camiones ligeros, bases de sillas para proteger alfombras, estantes, etc.

- Otros: raquetas de ping pong, suelas para zapatos, charolas, asientos de bicicleta, recipientes industriales, carpetas, casas para mascotas, fantasmas para carretera, etc.

7 PROPUESTA DE UN PROCESO A NIVEL INDUSTRIAL

7.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

Analizando los datos obtenidos durante el trabajo de campo y la experimentación, se propone un proceso semicontinuo para lograr el reciclaje de PVC, cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 7.1. Este proceso es susceptible de tener un sinnúmero de variaciones con el fin de optimizarlo, ya sea mediante su automatización, incrementar el número de equipos, etc.

El proceso aquí propuesto es fácil de implementar, requiere de una baja inversión inicial y de bajos costos de operación. Este proceso está formado por las siguientes partes:

- Recolección.
- Transportación.
- Selección.
- Cortado.
- Lavado.
- Enjuague.
- Molido.
- Secado.
- Empacado.
- Transformación.

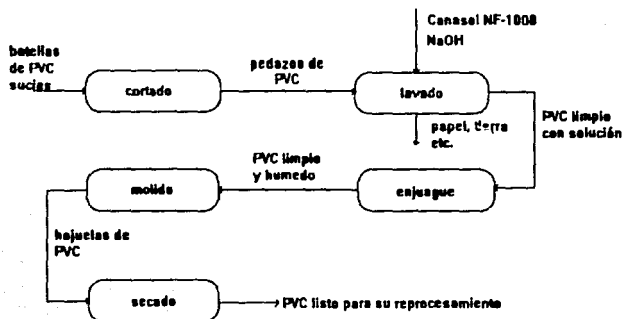


Figura 7.1. Diagrama de flujo del proceso de reciclado de botellas de PVC.

En las siguientes líneas se describen las características fundamentales de cada bloque de operaciones, tales como equipos, capacidad, personal, costos, servicios, etc.

La recolección de la materia prima se lleva a cabo en los tiraderos de basura, mediante la llamada pepena, en la cual se seleccionan botellas de aceite comestible y similares. El precio de las botellas oscila entre \$300 y \$450 el kg, dependiendo del basurero del que se recojan y de la transportación.

Previo a su transportación, las botellas son aplastadas, a fin de aumentar la cantidad de botellas a transportar. De esta forma, se facilita su posterior identificación en las instalaciones de la planta de reciclado.

La selección de las botellas se lleva a cabo de forma manual por parte de un empleado con conocimiento del tipo de botella que tiene que rechazar. El mismo empleado se encarga del cortado de las botellas, una vez hecha la selección.

El cortado de las botellas se lleva a cabo en un molino de cuchillas con una capacidad de por lo menos 50 kg/hr. utilizando un tamiz con agujeros de 7 x 6 cm.

El lavado el cual se basa en el método de limpieza presentado en la síntesis de resultados del Capítulo 5, se lleva a cabo por otro empleado, el cual maneja las canastas, llenándolas con el material proveniente del primer corte, pasando éstas a la operación de lavado; terminado el tiempo de lavado, el material se lleva a un enjuague dentro de las mismas canastas.

El enjuague es con agua, en un equipo de agitación con las mismas características al utilizado para el lavado. El tiempo de enjuague debe ser de cinco minutos aproximadamente.

Tanto la solución de lavado como el agua de enjuague se filtran y se reciclan.

Es recomendable el uso de dos lavadoras para aumentar la eficiencia del sistema y de los empleados.

El molido se realiza en un cortador de cuchillas, similar al utilizado para el primer corte, haciendo pasar al material a través de un tamiz con agujeros de 6 mm de diámetro, entregando las partículas de un tamaño adecuado para su transformación. La operación de molido se realiza después de escurrir el material, a fin de que permanezca con un poco de humedad, evitando un sobrecalentamiento de las cuchillas y la posible degradación del PVC durante la operación.

Posterior al molido, el material pasa a una operación de secado, en esta operación se utiliza un secador con aire a contraflujo, eliminando la humedad remanente. Terminada esta operación el material se encuentra listo para su empaque, su distribución y su procesamiento.

Las características de los equipos para el proceso se especifican en el Apéndice D.

La lavadora tiene una capacidad de 5 kg en cada operación de limpieza, si se trabaja con dos lavadoras, se lavan 10 kg de material por cada 12 minutos aproximadamente, logrando lavar 50 kg de PVC por hora. El material proveniente del basurero, como se demostro con los experimentos, tiene cerca de un 6 % de suciedad en peso, por lo que al terminar la operación de limpieza se obtienen 47 kg de material limpio aproximadamente.

8 CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha demostrado la importancia del reciclaje de los desechos plásticos, ya que como se mencionó en el Capítulo 1, éstos representan un grave problema de contaminación en México y en particular en las grandes ciudades como el Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey, etc.

El buscar soluciones a este problema es algo que compete a todos los habitantes del país, pero en especial a nosotros los profesionistas, ya que contamos con los conocimientos, antecedentes y criterio para hacer algo al respecto, de forma eficiente.

Este trabajo presenta una de tantas posibles soluciones al problema de los desechos plásticos, la cual consideramos eficiente, económica y fácil de implementar.

Se puede concluir que el PVC tiene gran demanda en lo que respecta a artículos fabricados con material virgen, por lo que se hace necesaria una implementación rápida de este proceso de reciclaje. Una cuestión de vital importancia para que sea factible el reciclado, será la aceptación por la sociedad, de los artículos que aquí se han enumerado, ya que debido a cuestiones ideológicas y de incultura, estos productos pueden llegar a ser rechazados por ella.

En cuanto a los sistemas del proceso de reciclado, éstos pueden sufrir ciertas modificaciones, relacionadas íntimamente con el costo del proceso, las cuales pueden hacer de éste un proceso más eficiente. En este trabajo se presenta el proceso de recuperación y reciclaje para implementación inmediata, basados en diferentes sistemas, los cuales fueron seleccionados por su funcionalidad y costo principalmente, haciendo de este proceso uno de los más viables y económicos para la microindustria.

Los sistemas seleccionados, fueron probados, comprobando su eficacia mediante la obtención de material de calidad para aplicación en productos diversos útiles al hombre.

Como se mencionó anteriormente, durante el desarrollo del presente trabajo se encontró un material diferente al que nos ocupaba en primera instancia (PET), el cual presenta algunas características físicas similares al PVC, pero con propiedades termodinámicas diferentes, por lo que son incompatibles.

El PET, a pesar de ser incompatible directamente con el PVC, puede ser adicionado a éste como carga durante la extrusión, disminuyendo las propiedades mecánicas del producto final, pero reduciendo los costos de operación del proceso, este material es útil para aplicaciones diferentes a las del producto de PVC puro reciclado como se observa en la Sección 6.2.

Consideramos que el reciclaje de plástico será uno de los negocios más promisorios en la década de los noventas, debido al gran auge que tienen en la actualidad, a la necesidad de disminuir en todo lo posible los desperdicios humanos y a la necesidad de obtener algún beneficio económico de éstos.

El proceso de reciclaje, se verá beneficiado si se realizan acciones gubernamentales que simplifiquen el proceso, tales como: realizar campañas que concienticen a la ciudadanía del grave problema que representan los diferentes desechos en el medio, haciendo necesaria una separación de desechos en las casas, conforme al tipo de desperdicio, es decir, separar vidrio, plástico, papel, cartón, metales y el resto de desperdicios orgánicos. Con esto, se simplificarían algunas etapas del proceso de reciclado, haciéndolo más económico y eficiente; la privatización de la recolección de la basura ayudaría en mucho a la disminución de vertederos y de tiraderos a cielo abierto.

El proceso que se propone como una posible alternativa para reciclar el PVC es un proceso sencillo, barato y fácil de implementar. Después de realizar el trabajo de campo, la experimentación necesaria y el análisis para seleccionar la mejor alternativa del proceso, se puede observar que es un proceso de bajos niveles de producción cuando se trabaja con el equipo piloto.

Cuando la producción de material reciclado es baja, se hace necesaria la transformación de la materia prima a productos terminados por parte de la misma empresa recicladora a fin de que el reciclaje sea atractivo económicamente.

Es posible aumentar los volúmenes de producción si se extrapolan los resultados. Un equipo industrial para el reciclado de plásticos se puede automatizar casi por completo, logrando altos volúmenes de producción, bajando los costos del proceso y aumentando la eficiencia del mismo. Se pueden llegar a reciclar la totalidad desechos de botellas de PVC (412.89 ton/mes en el Distrito Federal) y venderse como materia prima a industrias dedicadas a la transformación de polímeros.

Finalmente, el verdadero beneficio potencial está en los productos mejorados y con valor añadido que puedan ser fabricados a partir de la resina recuperada.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Garbage Then & Now", Editado por National Solid Waste Management Association, USA, (1990).
- [2] Mónica Conde Ortiz, "Reciclado de plásticos el negocio de los 90's", conferencia organizada por el Instituto Mexicano del Plástico Industrial, México, D.F., (Enero 1991).
- [3] Ramiro Rodríguez y Tomás González, "Los basureros como fuente potencial de contaminación", editado por el Instituto Autónomo de Investigaciones Ecológicas A.C., México, D.F., pp 110-115, (1989).
- [4] Amando Padilla Ramírez, "Reciclaje de plásticos" Conferencia presentada en la 1ª semana del plástico en el IPN, México, D.F., (Abril 1988).
- [5] Carlos Rangel, "Los plásticos: materiales del siglo XX", editado por SEP-UNAM, México, D.F., (1986), p 55.
- [6] Amando Padilla Ramírez y Antonio Sánchez, "Repercusión de los plásticos en el ecosistema", Industri Noticias, Julio-Agosto, pp 49-55, (1989).
- [7] Harvey Alter, "Disposal and reuse of plastics", Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, vol. 5, segunda edición, editada por John Wiley & Sons, USA, (1986), pp 103-126.
- [8] Miguel Arroyo, "Reciclado de plásticos", Cursos de capacitación para el personal de la industria, CIQA., México, D.F., (1986).
- [9] Miora Marx Nir, "Recycling, implications of post-consumer plastic waste", Plastics Engineering, vol. 46, num. 9, pp 29-52, (Sept 1990), vol 46, no 10, pp 21-28, (Oct 1990).
- [10] "Cloruro de Polivinilo", seminario La era del plástico presentado por el Instituto Mexicano del plástico industrial, México, D.F., (1990).

- [11] "PVC documento promocional", editado por: Alta Resin SA. de CV., Grupo Primex SA. de CV., Polycid SA. de CV., Polímeros de México SA de CV., México, D.F., pp 45-54, (1988).
- [12] Keith R. Kriesher, "PVC Faces up to the challenge of its environmental reputation", *Modern Plastics International*, pp 42-45, (Sept 1990).
- [13] Robert D. Leaversuch, "Reciclado de PVC: el PVC no tiene por que ser forraje para vertederos", *Plásticos Modernos*, No. 401, pp 739-744, (Nov 1989).
- [14] R.D. Deanin, "Polyblends", en *Encyclopedia of Polymer Science and Tecnology*, vol 2 suplemento, editado por John Wiley & Sons, USA, (1977), pag 462.
- [15] W.L. McCabe y J.C. Snich, "Unit Operations of Chemical Engineering", segunda edición, McGraw-Hill, Nueva York, USA, (1967), capítulo 9 Agitation & mixing of liquids, pp 241-276.
- [16] Perry, J.H., "Circulations mixers", *Mixing equipment, Handbook of Chemical Engineers*, 4ª edición, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, USA., (1963), sección 19, pp 5-16.
- [17] Rubén R. Lozano y Ricardo Arellano, "La industria convertidora y la recuperación y reciclaje de sus desperdicios", *Plasti-Noticias*, (Abril 1988).
- [18] PH. Burgard, "Recycling of PVC bottles: properties of products manufactured with regenerated PVC", *Journal of Applied Polymer Science*, vol 35.
- [19] Robert D. Leaversuch, "Industry begins to face up to the crisis of recycling", *Modern plastics International*, pp 40-43, (Abril 1987).
- [20] Robert D. Leaversuch, "Practicality is the key in new strategies for recycling", *Modern Plastics International*, pp 100-101, (Oct 1987).
- [21] "El mercado del reciclado del PET se encuentra en un momento prometedor", *Revista de Plásticos Modernos*, num.393, pp423-425, (Marzo 1989).

APENDICE A. CARACTERISTICAS DE LOS COMPUESTOS DE PVC.

Cuando el PVC (resina) se combina con aditivos se denomina compuesto de PVC, el cual puede ser rígido o flexible. Las propiedades físicas de ambos compuestos se enlistan en la Tabla A.2.

Particularmente, las botellas de PVC empleadas para envasar aceite comestible se manufacturan empleando un compuesto rígido. La formulación de uso común en las botellas de PVC en el mercado nacional se observa en la Tabla A.1 (10).

Tabla A.1. Formulación de botellas de PVC

PROCESO: Extrusión y Soplado.
RESINA DE PVC: tipo masa o suspensión, K=57, rígido, 100 partes
ESTABILIZADOR PRIMARIO: Metil Estaño 2%
MODIFICADOR DE IMPACTO: Acrilato/Metil Metacrilato 13%
MODIFICADOR DE FLUJO: Polimetil Metacrilato 2%
PIGMENTO: Violeta 0.002%.

El proceso de fabricación de las botellas de PVC, consiste en la extrusión de un tubo y soplado dentro de un molde con la forma final de las botellas.

Tabla A.2. Propiedades físicas del PVC.

PROPIEDADES	COMPUESTO		UNIDADES
	RIGIDO	FLEXIBLE	
FISICAS			
DENSIDAD	1.35-1.45	1.15-1.35	gr/cm ³
ABSORCION DE AGUA ESPESOR DE PARED 3.2 mm	0.08-0.4	0.2-0.8	%
MECANICAS			
RESISTENCIA A LA TENSION	400-650	100-250	Kg/cm ²
RESISTENCIA AL IMPACTO (IZOD)	5-12	-	Kg/cm ²
ELONGACION A LA RUPTURA	10-100	200-450	%
DUREZA	70-80	50-100 A	SHORE
TERMICAS			
CALOR ESPECIFICO	0.25-0.35	0.3-0.5	cal/gr°C
TEMPERATURA DE DISTRORCION POR CALOR	55-75	-	°C
COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA	500-100	700-2500	10 ⁻⁵ /°C
ELECTRICAS			
RESISTENCIA AL ARCO	60-80	-	seg
RESISTIVIDAD VOLUMETRICA (HUMEDAD RELATIVA 50 % @ 23°C	10-12-12-16	10-11-10-14	ohmcm
RESISTENCIA DIELECTRICA (ESPESOR DE PARED 3.2 cm)	137-195	117-156	kV/mm
CONSTANTE DIELECTRICA	3.4-4.0	5.0-9.0	@ 60 Hz

APENDICE B. METODO DE SELECCION DE ALTERNATIVAS

Para hacer una correcta selección de alternativas se tienen que seguir una serie de pasos, a fin de escoger la alternativa más eficiente u óptima para resolver el problema, los pasos a seguir recomendados por diversos autores son:

1.- Análisis de requisitos de las alternativas.

En este primer paso, se analizan los requerimientos de cada sistema en base a los mejores resultados que se pueden esperar, como son: bajos costos, alta eficiencia, calidad, etc..

2.- Generación de alternativas

En una segunda etapa, se generan diferentes alternativas en base a la experiencia, o bien posibles alternativas reportadas en la literatura.

3.- Filtración de alternativas.

En esta etapa, se realiza un filtrado general de las alternativas en base a la falta de cumplimiento de los resultados esperados en el paso anterior, como pueden ser: muy alto costo, falta de disponibilidad, largo periodo de implementación, etc..

4.- Selección de alternativas candidatas.

Dentro de cada sistema se selecciona una o varias alternativas con las cuales se procederá a hacer un análisis más detallado, a fin de seleccionar la más adecuada para la solución del problema. Este análisis puede basarse en resultados obtenidos de la experimentación.

5.- Selección de alternativas.

En el caso de existir más de una posible solución para un sistema, se genera una matriz de selección en base a diferentes criterios, de menor importancia que los del filtrado, pero que llevan a una óptima selección de alternativas. Estos criterios pueden ser: nivel de producción, línea de producción más corta, mejor limpieza, menor número de empleados, etc..

APENDICE C. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE AGITACION Y LAVADO DEL PVC.

Las pruebas realizadas consistieron en determinar el consumo de potencia de diferentes tipos de agitadores, mediante la medición del consumo de corriente, en función del número de rpm y del contenido de carga de material a lavar.

Los agitadores probados son del tipo turbina y se señalan con un código de dos números, el primero de ellos indica el número de paletas y el segundo el ángulo de inclinación de éstas respecto al eje del agitador. Estos agitadores tienen un diámetro de 9 cm, el diámetro del eje es de 1 cm y las paletas miden 4 cm por lado.

Los agitadores probados fueron: agitador 4-30 (4 aspas a 30°), agitador 4-45, agitador 3-45, agitador 2-45 y agitador 2-0.

La metodología de los ensayos consistió en determinar en principio la energía consumida por el motor trabajando en vacío y posteriormente se realizaron mediciones con cada uno de los agitadores trabajando con 10 lt. de agua únicamente.

Se realizaron pruebas aumentando la carga de PVC registrándose los siguientes datos:

AGITADOR 4-30				POTENCIA
CARGA [gr]	rpm	1080	740	[w]
0		699.78	686.94	225
200		834.80	731.88	821.62
320		910.57	752.21	825.33
440		911.64	758.63	822.86
				817.92

AGITADOR 4-45				POTENCIA
CARGA [gr]	rpm	1080	740	[w]
0		704.06	699.78	225
200		738.31	684.80	824.09
320		783.24	710.48	821.62
440		841.02	717.97	816.68
				814.21

AGITADOR 3-45				POTENCIA [w]
CARGA [gr]	rpm	1080	740	225
0		697.64	691.22	824.09
200		777.89	685.87	810.50
320		805.71	695.50	810.50
440		813.20	727.60	822.86

AGITADOR 2-45				POTENCIA [w]
CARGA [gr]	rpm	1080	740	225
0		699.78	669.82	811.74
200		725.46	680.52	814.21
320		765.05	689.08	810.50
440		834.60	709.41	817.92

AGITADOR 2-0				POTENCIA [w]
CARGA [gr]	rpm	1080	740	225
0		715.83	690.15	830.27
200		763.98	706.20	822.86
320		781.10	712.62	810.50
440		823.90	731.88	804.32

Se realizaron otras pruebas a alta velocidad (1080 rpm) con cada agitador y cada carga variando la posición del agitador con respecto al tanque, desde el fondo (1) hasta la superficie (5).

AGITADOR 4-30		1080 rpm P	P [w]
POS	CARGA 200 [gr]	CARGA 320 [gr]	CARGA 440 [gr]
1	866.70	834.60	877.40
2	823.90	781.10	834.60
3	740.44	753.28	770.40
4	714.76	732.95	727.60
5	706.20	706.20	708.34

AGITADOR 4-45		1080 rpm P	P [w]
POS	CARGA 200 [gr]	CARGA 320 [gr]	CARGA 440 [gr]
1	770.40	850.65	881.68
2	757.56	754.35	798.22
3	747.93	717.97	725.46
4	729.74	705.13	701.92
5	724.39	697.64	688.01

AGITADOR 3-45		1080 rpm P	P [w]
POS	CARGA	CARGA	CARGA
	200 [gr]	320 [gr]	440 [gr]
1	832.60	898.80	834.60
2	787.52	791.80	813.20
3	749.00	742.58	749.00
4	749.00	727.60	706.20
5	738.30	723.32	691.22

AGITADOR 2-45		1080 rpm P	P [w]
POS	CARGA	CARGA	CARGA
	200 [gr]	320 [gr]	440 [gr]
1	856.00	813.20	843.16
2	802.50	749.00	759.70
3	791.80	731.88	436.16
4	791.80	723.32	716.90
5	781.10	706.20	706.20

AGITADOR 2-0		1080 rpm P	P [w]
POS	CARGA	CARGA	CARGA
	200 [gr]	320 [gr]	440 [gr]
1	898.80	823.90	920.20
2	775.75	775.75	866.70
3	752.21	751.14	793.94
4	741.51	745.79	781.10
5	712.62	719.04	749.00

Para todos los agitadores se midió la corriente en vacío a diferentes revoluciones.

VELOCIDAD [rpm]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]
225 3 FASES	2.35-2.15-2.15	821.62
740 2 FASES	3.18-3.22	684.80
1080 2 FASES	3.25-3.25	695.50

El voltaje entre fases medido fue de 214 Volts.

Con los mismos agitadores del experimento descrito anteriormente, se determinó la potencia consumida durante la agitación, variando las revoluciones por minuto, con el motor trabajando en dos y tres fases a: 85, 170, 225, 370, 450, 540, 740 y 1080 rpm. La medición de corriente se hizo con los agitadores trabajando únicamente con agua y con una carga de 320g; observándose que la diferencia en el consumo de energía no es significativa cuando el motor trabaja sin carga y cuando trabaja con la máxima carga.

Los datos arrojados en esta parte de la experimentación se encuentran en las siguientes tablas:

AGITADOR 4-30		POTENCIA [W]	
VEL. [rpm]	CARGA = 0 [gr]	CARGA = 320 [gr]	
85	822.80	809.14	
225	820.26	806.55	
370	832.49	822.86	
540	837.68	836.20	
170	640.93	636.65	
450	652.12	646.21	
740	688.01	704.06	
1080	759.70	792.87	

AGITADOR 4-45		POTENCIA [W]	
VEL. [rpm]	CARGA = 0 [gr]	CARGA = 320 [gr]	
85	817.67	817.67	
225	822.86	822.86	
370	832.49	832.49	
540	839.91	839.91	
170	639.78	638.79	
450	651.63	651.63	
740	682.66	682.66	
1080	739.37	739.37	

AGITADOR 3-45		POTENCIA [W]	
VEL. [rpm]	CARGA = 0 [gr]	CARGA = 320 [gr]	
85	821.38	808.03	
225	820.26	816.56	
370	826.56	823.97	
540	838.80	831.38	
170	652.70	634.51	
450	654.84	650.56	
740	688.01	700.85	
1080	749.00	802.50	

AGITADOR 2-45 VEL. [rpm]	POTENCIA [W]	
	CARGA = 0 [gr]	CARGA = 320 [gr]
85	822.86	813.95
225	827.68	812.85
370	825.08	816.56
540	848.80	830.27
170	644.14	635.58
450	458.05	648.42
740	710.48	694.43
1080	765.05	777.89

AGITADOR 2-0 VEL. [rpm]	POTENCIA [W]	
	CARGA = 0 [gr]	CARGA = 320 [gr]
85	820.26	806.55
225	822.86	810.26
370	833.98	822.86
540	839.91	833.98
170	646.28	623.81
450	460.19	648.42
740	697.64	716.90
1080	778.96	803.57

El consumo de potencia en base a la carga de PVC a nivel planta piloto es:

LAVADORA DE 500 LTS

CARGA [kg] PVC	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	POTENCIA [W]
0	3.0-3.0-3.0	215	1117
1	3.0-3.1-3.2	"	1154
2	3.0-3.1-3.2	"	1154
3	3.1-3.1-3.2	"	1166
4	3.0-3.1-3.3	"	1166
5	3.5-3.6-3.7	"	1340

APENDICE D. CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL RECICLAJE DE BOTELLAS DE PVC.

Los equipos a utilizar para completar el proceso son: dos equipos para cortado y molido, dos equipos de agitación y un equipo de secado, los cuales se especifican a continuación.

Equipo de cortado. Cortador de cuchillas rotatorio. Con una capacidad de por lo menos 50 kg/hr, este equipo utiliza un motor de 10 hp. El equipo de cortado se muestra en la Figura D.1. La diferencia entre el equipo de cortado y el equipo de molido es el tamiz que se utiliza. Para la operación de cortado el tamiz debe tener agujeros de 6 x 7 cm; para la operación de molido se requiere de un tamiz con agujeros de 6 mm de diámetro. Estos equipos tienen un costo en el mercado nacional de \$14,200,000. c/u.

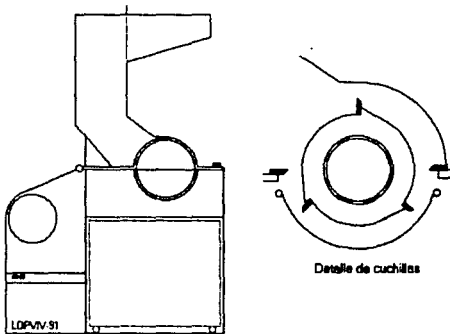
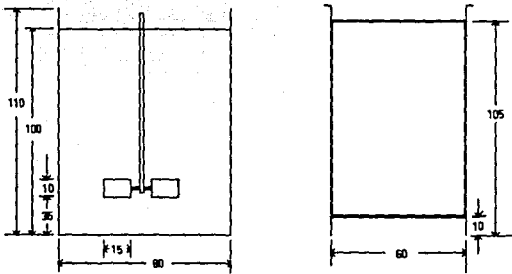


Figura D.1. Equipo para cortado y molido de PVC.

Equipo de agitación. El equipo de agitación utilizado es el estudiado en el Capítulo 5 y se observa en la Figura 4.3. Las dimensiones de éste se muestran en la Figura D.2. El equipo requiere de un motor eléctrico de 1 hp. que gire a una velocidad de 1740 rpm. El sistema de transmisión de potencia a base de poleas reduce la velocidad hasta aproximadamente 1200 rpm. El equipo de agitación es de fabricación sencilla, el costo estimado para cada equipo incluyendo tres canastas para el PVC es de \$2,000,000.



acotación en cm.

Figura D.2. Dimensiones del equipo de agitación.

Equipo de secado. Secador rotatorio, que trabaja con aire a temperatura ambiente, a contraflujo. El equipo debe tener una capacidad de por lo menos 50 kg/hr. Trabaja con un motor eléctrico de 1 hp. para el movimiento del material y con un ventilador eléctrico de 0.5 hp. Este secador se muestra en la Figura D.3, y su costo se estima en aproximadamente \$4,000,000. en el mercado nacional.

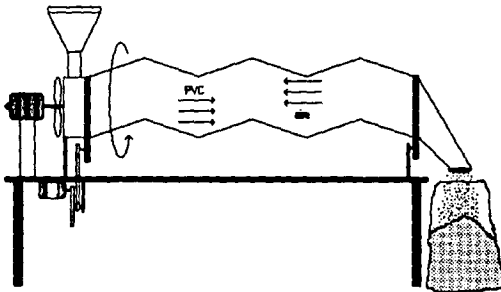


Figura D.3. Secador.