

ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO EN CIENCIAS DE LA ENERGIA Y
MECANICA**

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

TITULO DEL PROYECTO:

**“DETERMINACION Y SELECCION DE LOS METODOS DE
IDENTIFICACION DE PLASTICOS DE DESECHO PARA LA
INDUSTRIA DEL RECICLAJE”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO
MECANICO**

REALIZADO POR:

RAMIRO JOSÉ PÉREZ JÁCOME

DIRECTOR: ING. PATRICIO QUEZADA

CODIRECTOR: ING. XAVIER SANCHEZ

Sangolquí, 16 de junio de 2011

CERTIFICACION DE LA ELABORACION DEL PROYECTO

El proyecto “DETERMINACION DE LOS METODOS DE IDENTIFICACION DE PLASTICOS DE DESECHO PARA LA INDUSTRIA DEL RECICLAJE” fue realizado en su totalidad por el Sr. RAMIRO JOSÉ PÉREZ JÁCOME, como requerimiento previo para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Patricio Quezada

DIRECTOR

Ing. Xavier Sánchez

CODIRECTOR

Sangolquí, 16 de junio de 2011

LEGALIZACION DEL PROYECTO

**“DETERMINACION DE LOS METODOS DE IDENTIFICACION DE
PLASTICOS DE DESECHO PARA LA INDUSTRIA DEL
RECICLAJE”**

ELABORADO POR:

RAMIRO JOSÉ PÉREZ JÁCOME

DEPARTAMENTO EN CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

ING. XAVER SANCHEZ

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

Sangolquí, 16 de junio de 2011

DEDICATORIA

*Este trabajo, lo que representa, y mi existencia,
está dedicado a mis padres,
mis modelos a seguir, mis héroes,
el corazón y la razón, el amor y la sabiduría,
de quienes es realmente este logro.*

*A mi hermano, mi mejor regalo, mi mejor amigo,
quien me ha dado apoyo incondicional, consejos y alegría,
fundamentales para no decaer.*

*A mis hermanos de vida, tanto mi primo como el gajo,
de quienes, he aprendido y sigo aprendiendo cada día,
quienes están siempre presentes,
divirtiéndonos cuando se debe,
o siendo sinceros y responsables cuando es necesario.*

*Por último dedico este trabajo a todos aquellos
que antes de ser ingenieros son personas, son seres humanos.*

*Que no se venden ni callan sus verdades,
que son capaces de morir por lo que creen
y que pueden ser felices con los pequeños detalles de la vida.*

*A quienes nunca se preguntan el porqué de las cosas,
dedicado a quienes se preguntan “por que no”.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por haberme dado el entorno que me dio, sin el cual no sería quien soy ahora.

A las personas que confiaron en mí, y me reprendieron cuando era necesario o me dieron una mano para que no me hunda hasta el fondo, ni me quede estancado.

A los profesores y compañeros supieron tenerme paciencia, reconocer mis virtudes, y corregir mis fallas.

Al Tecnólogo Fausto Espín por la apertura prestada a la hora de realizar ciertas pruebas en el laboratorio de física.

Y por ultimo al Director de este proyecto Ing. Patricio Quezada por siempre buscar una solución ante los problemas, y al Codirector Ing. Xavier Sánchez por ver las deficiencias del trabajo para que se perfeccione.

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACION DE LA ELABORACION DEL PROYECTO	iii
LEGALIZACION DEL PROYECTO	v
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	ix
INDICE DE CONTENIDOS	xi
INDICE DE TABLAS	xv
INDICE DE GRAFICAS	xvii
INDICE DE FIGURAS	xviii
LISTADO DE ANEXOS	xx
RESUMEN	xxi
CAPITULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
1.4 ALCANCE	5
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	6
2.1 TEORIA GENERAL DE LOS PLASTICOS	1
2.1.1 POLIMEROS	6
2.1.2 CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS.....	8
2.1.2.1 Termoplásticos	8
2.1.2.2 Termoestables	11
2.1.2.3 Elastómeros.....	12
2.1.3 POLIMERIZACION	13
2.1.3.1 Polimerización por adición.....	14
2.1.3.2 Polimerización por condensación	14

2.1.3.3 Polimerización en masa.....	15
2.1.3.4 Polimerización en solución	15
2.1.3.5 Polimerización en emulsión	16
2.1.3.6 Polimerización en suspensión	16
2.2 PLASTICOS UTILIZADOS EN EL RECICLAJE.....	17
2.3 CARACTERISTICAS DE LOS PLASTICOS UTILIZADOS EN EL RECICLAJE	21
2.3.1 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE).....	21
2.3.1.1 Polietileno de baja densidad lineal (LLDPE).....	22
2.3.2 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)	24
2.3.3 POLICLORURO DE VINILO (PVC).....	25
2.3.4 POLIPROPILENO (PP)	27
2.3.5 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)	29
2.3.6 POLIESTIRENO (PS).....	31
2.4 METODOS DE IDENTIFICACION DE PLASTICOS	33
2.4.1 MACROCLASIFICACION.....	33
2.4.1.1 Espectroscopia	33
2.4.1.2 Rayos X.....	36
2.4.1.3 Identificación por laser.....	37
2.4.1.4 Sistemas de marcación	38
2.4.1.5 Luz polarizada	39
2.4.1.6 Prueba de ensayo a la llama	40
2.4.2 MICROCLASIFICACION	41
2.4.2.1 Método de hundimiento-flotación.....	41
2.4.2.2 Método de flotación por espuma	43
2.4.2.3 Disolución selectiva y devolitizacion por destello	44
2.4.2.4 Fricción electrostática	45
2.4.2.5 Temperatura de reblandecimiento.....	45
2.4.2.6 Análisis térmico: Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	46
2.4.2.7 Otros.....	51

CAPITULO 3: ANALISIS Y SELECCIÓN DE METODOS PARA SER UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA	52
3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS METODOS APLICABLES A LA INDUSTRIA ECUATORIANA.....	52
3.1.1 CRITERIO SOBRE EFICACIA	52
3.1.2 CRITERIO SOBRE EFICIENCIA.....	52
3.1.3 CRITERIOS TECNICO/OPERABILIDAD/RIESGO.....	53
3.1.4 CRITERIO ECONOMICO-FINANCIERO.....	54
3.1.5 CRITERIO DE ACCESIBILIDAD EN EL ECUADOR	54
3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	55
3.2.1 ESCALA DE VALORACION	55
3.2.2 TABLA DE VALORES DE ALTERNATIVAS-MATRIZ DE DECISION ..	60
CAPITULO 4: ESTUDIO DE LOS METODOS SELECCIONADOS PARA SU IMPLEMENTACION	75
4.1 PROCEDIMIENTO PRACTICO PARA LA IMPLEMENTACION EN LA INDUSTRIA DE LOS METODOS SELECCIONADOS.....	75
4.1.1 HUNDIMIENTO-FLOTACION.....	75
4.1.2 FLOTACION POR ESPUMA	79
4.1.3 INFRARROJO	81
4.1.4 IDENTIFICACION POR LASER – ESPECTROMETRIA RAMAN	85
4.1.5 RAYOS X.....	90
4.1.6 LUZ POLARIZADA	92
4.1.7 FRICCION ELECTROSTATICA	93
4.1.8 PRUEBA DE ENSAYO A LA LLAMA	100
CAPITULO 5: PRUEBAS DE APLICACIÓN DE LOS METODOS SELECCIONADOS	101
5.1 PRUEBAS DE LABORATORIO SEGÚN EL METODO SELECCIONADO ..	102
5.1.1 HUNDIMIENTO-FLOTACION.....	105
5.1.2 LUZ POLARIZADA	112
5.1.3 FRICCION ELECTROSTATICA	116
5.1.4 FLOTACION POR ESPUMA	125

5.1.5 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA	135
5.1.6 ANALISIS TERMICO	136
5.1.7 PRUEBA DE ENSAYO A LA LLAMA	137
5.2 ANALISIS DE RESULTADOS APLICABLES A LA INDUSTRIA.....	148
CAPITULO 6: ANALISIS ECONOMICO-FINANCIERO	151
6.1 COSTOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS COMO PRUEBAS DE LABORATORIO	151
6.2 DETERMINACION DEL METODO MAS ECONOMICO APLICABLE A LA INDUSTRIA CON BUENOS RESULTADOS PLANTEADOS	152
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	158
7.1 CONCLUSIONES	158
7.2 RECOMENDACIONES	159
BIBLIOGRAFIA	161

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Código de identificación de plásticos	3
Tabla 2.1 Selección de algunos termoplásticos con sus usos frecuentes	9
Tabla 2.2 Temperatura de fusión para algunos termoplásticos seleccionados	11
Tabla 2.3 Selección de algunos termoestables con sus usos frecuentes	12
Tabla 2.4 Selección de algunos elastómeros con sus usos frecuentes	13
Tabla 2.5 Propiedades/Características de LDPE	22
Tabla 2.6 Propiedades/Características del LLDPE	23
Tabla 2.7 Propiedades/Características del HDPE	24
Tabla 2.8 Propiedades/Características del PVC	26
Tabla 2.9 Propiedades/Características del PP homopolímero	28
Tabla 2.10 Propiedades/Características del PP copolímero	29
Tabla 2.11 Propiedades/Características del PET	30
Tabla 2.12 Propiedades/Características del PS cristal	32
Tabla 2.13 Propiedades/Características del PS alto impacto	32
Tabla 2.14 Prueba de identificación mediante combustión	41
Tabla 2.15 Rango de densidades de los termoplásticos	42
Tabla 3.1 Matriz para el análisis del valor	59
Tabla 3.2 Matriz de decisión	73
Tabla 4.1 Dimensionamiento de los tanques de separación	78
Tabla 4.2 Láseres utilizados en la industria	86
Tabla 5.1 Resultados de ensayo de flotación	108
Tabla 5.2 Soluciones para la obtención de diferentes densidades	110
Tabla 5.3 Combinaciones PET-PVC cargados por fricción	118
Tabla 5.4 Separación por espuma de PET y PVC negro en función del espumante	129
Tabla 5.5 Separación por espuma PVC transparente en función de PVP, espumante y tiempo de acondicionamiento	132

Tabla 5.6 Separación por espuma PVC transparente en función del tamaño del elemento	134
Tabla 5.7 Resumen del comportamiento de los polímeros a la llama	147
Tabla 6.1 Costo de las pruebas realizadas	151
Tabla 6.2 Costo de implementación del procedimiento de hundimiento-flotación	153
Tabla 6.3 Costo de implementación del procedimiento de flotación por espuma para separación de PET y PVC	154
Tabla 6.4 Costo de implementación del procedimiento de fricción electrostática para separación de PET y PVC	155
Tabla 6.5 Costo de implementación del procedimiento de espectroscopia infrarroja	156
Tabla 6.6 Costo de implementación del procedimiento de luz polarizada para separación de PET y PVC	157

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 2.1 Plásticos de desecho en la industria de U.S, año 2000.....	18
Grafica 2.2 Plásticos de desecho vs. Plásticos reciclados en Australia, año 2006	19
Grafica 2.3 Polímeros importados por Ecuador en el año 2008.....	20
Grafica 5.1 Porcentaje de comportamiento deseado de cada polímero/por tanque de separación.....	109

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación de la diferencia entre homopolímero y copolímero	7
Figura 2.2 Estructura fundamental del polietileno	21
Figura 2.3 Estructura fundamental del policloruro de vinilo.....	25
Figura 2.4 Estructura fundamental del polipropileno	27
Figura 2.5 Polipropileno isotáctico	27
Figura 2.6 Polipropileno sindiotáctico.....	27
Figura 2.7 Polipropileno atáctico	27
Figura 2.8 Estructura fundamental del tereftalato de polietileno	29
Figura 2.9 Estructura fundamental del poliestireno	31
Figura 2.10 Espectro electromagnético.....	34
Figura 2.11 Representación polarizador de luz.....	39
Figura 2.12 Representación de la caracterización de polímeros mediante polarizador de luz	40
Figura 4.1 Esquema de tambor rotatorio para separación de plásticos por densidades.....	75
Figura 4.2 Esquema de tambor rotatorio para separación de plásticos por densidades.....	76
Figura. 4.3 Separación de resinas por diferencia de densidades.....	77
Figura. 4.4 Esquema de funcionamiento-equipo de clasificación infrarrojo	82
Figura 4.5 Esquema del equipo identificador	83
Figura 4.6 Espectro IR del PET.....	84
Figura 4.7 Espectro IR del PEAD.....	84
Figura 4.8 Espectro IR del PP	85

Figura 4.9 Espectro IR del PS.....	85
Figura 4.10 Espectro Raman del PEAD.....	88
Figura 4.11 Espectro Raman del PP.....	88
Figura 4.12 Espectro Raman del PET.....	88
Figura 4.13 Espectro Raman del PS.....	89
Figura 4.14 Espectro Raman del PVC.....	89
Figura 4.15 Principio de obtención del espectro por rayos X.....	90
Figura 4.16 Esquema para implementación de luz polarizada.....	92
Figura 4.17 Serie triboeléctrica.....	94
Figura 4.18 Esquema de implementación del proceso de fricción electrostática ...	95
Figura 4.19 Serie triboeléctrica de algunos polímeros.....	96
Figura 4.20 Esquema del proceso de carga PET – PVC.....	97
Figura 4.21 Fotografía de mecanismo de separación de PET-PVC por fricción electrostática.....	97
Figura 4.22 Esquema de las fuerzas aplicadas a la separación electrostática.....	98
Figura 5.1 Ángulos de diferenciación de polímeros translucidos y transparentes	115
Figura 5.2 Esquema de equipo para combustión de plásticos-Vista frontal.....	139
Figura 5.3 Esquema de equipo para combustión de plásticos-Vista lateral.....	139

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A: Ensayos realizados en el CIAP-EPN

Anexo B: Normas referenciales

- ASTM D635
- ASTM D792
- ASTM D1505
- ASTM D3801
- ASTM D4093
- ASTM D5048

Anexo C: Clasificación automática de plásticos en tiempo real

RESUMEN

Este trabajo pretende dar una guía sobre algunos de los métodos, utilizados a gran escala y susceptibles de automatización, empleados para la identificación de los principales termoplásticos utilizados en la industria del reciclaje, con el fin de facilitar e incentivar este sector productivo.

Debido a que cada plástico se procesa de diferente manera, y muchos de ellos no pueden ser mezclados por tener un comportamiento térmico/reológico muy diferente, se emplean varios campos de la ciencia con el fin de identificar de manera eficiente los plásticos, considerando que es prácticamente imposible separar los plásticos desde la fuente.

Los procesos de separación se enfocaron estrictamente a los termoplásticos, debido a que según las tendencias son los de mayor demanda en el mercado y son los más factibles económicamente de recuperación.

Después de consultar las bases teóricas de los diferentes métodos, se utilizó una matriz de ponderación para indagar sobre las especificaciones técnicas de los métodos más útiles para nuestra propuesta, y la verificación del procedimiento.

De esta matriz los métodos de macroclasificación, es decir que no requieren un pretratamiento al elemento, y que se han analizado son:

Espectroscopia infrarroja: Este método emplea la ley de Planck ($E=h\nu$) como base de todas las leyes relativas a fenómenos de emisión y absorción de radiaciones electromagnéticas, tomando en cuenta que $\lambda = c / f$, y se emiten ondas del infrarrojo entre 800 a 2500 nm hacia la molécula polimérica, para afectar sus niveles cuánticos de vibración, con la cual absorbe cierta cantidad de energía dependiendo de su vibración natural y de los posibles niveles energéticos conocidos como bandas.

En primera instancia se buscó simular un método propuesto con la utilización de lámparas halógenas cercanas al infrarrojo, por un filtro infrarrojo de cámara fotográfica, pero para que la espectroscopia tenga éxito se debe seleccionar la

longitud de onda para encontrar las bandas características del material, este procedimiento lo realiza un AOTF, el cual no pudo ser encontrado en el mercado nacional ni por importación directa.

Con este antecedente el CIAP de la EPN presta el servicio de identificación de materiales por medio del espectro infrarrojo a través de transmitancia, donde se analizaron 5 elementos de naturaleza conocida, arrojando las siguientes bandas características

PS alto impacto: 966, 760, 700 cm^{-1} ; PEAD blanco y PEBD: 2920, 1463, 1376, 730-720 cm^{-1} ;

PP: 1456, 1376, 1167, 973 cm^{-1} ; PET: 1263, 1110, 872, 726 cm^{-1} ;

PVC transparente: 1427, 699 cm^{-1}

Luz polarizada: Basado en la disposición espacial de los átomos de un elemento, lo cual cambia el plano de propagación de las ondas electromagnéticas que lo atraviesen, debido a que contienen centros asimétricos o quirales, que por lo general son los monómeros $\text{H}_2\text{C}=\text{CHR}$ que polimerizan casi exclusivamente cabeza-cola. La verificación de este procedimiento se lo realizó en el laboratorio de física de la ESPE, donde conociendo que la luz se emite en todos los planos posibles dentro de los 360° , es necesario saber en primera instancia en que plano se encuentra la onda que pasara a través del objeto a analizar, para lo cual se colocó un polarizador entre la muestra y la fuente de luz, la cual se recomienda sea monocromática para obtener una sola onda al atravesar el objeto.

Basado en la norma ASTM D4093, la cual describe que la lámpara monocromática debe ser uniforme y de al menos $0.3\text{W}/\text{in}^2$ o $0.04653\text{W}/\text{cm}^2$, entonces se utilizó una lámpara de mercurio que tiene una producción de luz de más de $3\text{W}/\text{cm}^2$.

Al otro lado del objeto se colocó otro polarizador que tiene la libertad de rotar 360° para verificar el cambio de orientación del plano de la onda electromagnética, en los elementos translucidos.

Los resultados se detallan en la pág. 99 del proyecto ampliado

Prueba de ensayo a la llama: Este procedimiento esta una vez más basado en la ley de Planck, donde al excitar mediante la combustión las moléculas se emite un fotón de frecuencias diferentes para cada material de acuerdo a su salto cuántico. A pesar de que las características de la combustión del material son independientes de la forma de combustionarse, se tomaron como referencia parámetros de la normas ASTM D635, D3801 y D5048 para la selección de la llama mediante el poder calórico (GLP:117.23MJ/m³) y posicionamiento de la llama (45° hacia arriba), especificaciones de las muestras (espesor no mayor a 13mm), y elementos adicionales que ayudan a diferenciar características de cada material como colocar algodón bajo el punto de combustión para ver si el polímero fundido continua combustionandose al caer, entre otros.

La verificación de este método se lo realizo en el laboratorio de ciencia de los materiales con resultados esperados según la bibliografía y que se detallan en la pág. 132 del proyecto de grado.

Dentro de los métodos de microclasificación, es decir que requieren un tratamiento previo del material están:

Hundimiento-flotación: Este método utiliza la diferencia de densidades como mecanismo de separación. Primero se trituro los plásticos en el laboratorio de mecánica de materiales, con el fin de evitar fenómenos ajenos al procedimiento como superficie de contacto y empuje.

Para obtener las densidades del fluido de separación, se utilizo la referencia del Instituto Brasileiro de PVC, donde se especifican soluciones acuosas de sal y alcohol para obtener cuatro diferentes fluidos de separación, y clasificar los principales termoplásticos.

Este método fue comprobado en el laboratorio de física, y en vista de que los valores de las densidades propuestas por la bibliografía no separaban los

polímeros de manera satisfactoria, se llegó a otros valores que cumplieran con el objetivo, los cuales se describen en la pág. 94, tabla 5.2. Además se tabularon las cantidades de sal y alcohol necesarias para llegar a estas densidades, y se comprobaron mediante la fórmula $\rho = \frac{m}{V}$ con los vasos de precipitación y balanzas de dicho laboratorio.

También se propone un método automatizado de separación mediante tambores rotatorios que se dimensionan de acuerdo a recomendaciones de trabajos previos dados por la universidad de Tokio, con respecto a la relación entre masa de polímero y volumen de solución.

Flotación por espuma: Basado en las propiedades de hidrofiliidad e hidrofobidad de los materiales, este método se utiliza solo cuando el método anterior no arroja buenos resultados debido a la similitud en las densidades de los plásticos. Al igual que es método anterior, este es un sistema binario, y busca alterar la capacidad de los plásticos de atraer moléculas de agua, para que al inyectar burbujas de aire, estas no se adhieran al elemento tratado dejándolo en el fondo del fluido, mientras que dichas burbujas se pegaran al elemento no tratado llevándolo hasta la superficie del fluido. Para estabilizar las burbujas se requiere de un espumante o un tensoactivo o espumante.

Se tomo como referencia los trabajos de la Universidad de Tailandia, por lo que la verificación de este procedimiento se centro en la separación del PET y PVC mediante la aplicación de PVP (Polivinil pirrolidona) en cantidades descritas en la pág. 114 y 117 para convertir a hidrófilo al PVC. Las variables que se tomaron en cuenta para realizar estas pruebas fueron el peso y tamaño de los elementos a separar, el tiempo de tratamiento del polímero, y las cantidades de PVP así como de espumante.

Además para que las burbujas sean uniformes y estables al momento de la separación se las redujo al máximo mediante un aireador y la separación fue hecha con la solución agitándose constantemente a 1200 rpm. Este método arrojo resultados notablemente favorables.

Este método es ampliamente utilizado en la minería, por lo que los espumantes fueron adquiridos en la facultad de minas y petróleos de la Universidad Central y se busco la orientación del Ing. José Valencia, mientras que el PVP fue un elemento farmacéutico donado laboratorios LIFE.

Fricción electrostática: Este procedimiento se sustenta en la carga que adquieren los elementos al frotarse entre si, según la serie triboeléctrica. Dicha serie organiza varios elementos de forma descendente, siendo los más distantes los que se cargaran con mayor valor y cada elemento con cargas opuestas. El proceso finaliza al hacerlos pasar por un campo magnético uniforme y de gran intensidad. Para que los elementos se puedan separar eficientemente la fuerza magnética debe ser notablemente mayor que la fuerza de gravedad, como se puede visualizar en la pág. 83, por lo que es recomendable triturarlos al máximo para no aplicar un campo magnético tan grande.

Este procedimiento se comprobó en el laboratorio de física, primero frotando los diferentes elementos de PVC con los de PET sin triturarlos, puesto que estos son los más distantes en la serie, para ver cual adquiere mayor carga al acercarlo al electroscopio.

Para que exista un óptimo traspaso de electrones, los materiales deben estar completamente libres de humedad, y si es posible precalentarlos, por lo que los pre acondicionamos en un secador de manos con una temperatura de 50°C y una humedad del 10%. Después de esto se observo que el PVC transparente y rígido era más propenso al traspaso de electrones con el PET, por lo que se trituraron al máximo estos dos elementos.

La fórmula para dimensionar el campo magnético necesario separar los elementos toma en consideración: la densidad y las dimensiones del elemento, la distancia entre las placas que generan el campo, la distancia necesaria para medir el voltaje del elemento, el voltaje del elemento medido por un voltímetro electrostático de no contacto, y por último la distancia necesaria para medir dicho voltaje. Dicha fórmula se encuentra desarrollada en la pág. 84 del documento ampliado.

El campo no pudo ser calculado por no disponer del equipo necesario para medir la carga adquirida por el elemento. Entonces se tomó como referencia el valor propuesto por la bibliografía, que es de 240Kv/m, y aunque no se logro este valor, el campo se hizo de dos placas de cobre de 0.3mm de espesor conectadas a una fuente de DC de 10Kv logrando un campo de 222.2 a una distancia de 4.5cm. Cabe señalar que las placas de cobre no requieren mayor espesor puesto que bajo el análisis de la pág. 104 la superficie transversal al paso de energía es inversamente proporcional al voltaje.

En vista de que para el análisis los trozos de PET y PVC eran ópticamente similares, se los cargo en diferentes contenedores del material contrario y con un elemento reconocible para verificar la atracción hacia alguna de las placas del campo magnético. Al exponerlos al campo magnético se observo el comportamiento esperado para cada elemento, pero no pueden topar la placas del campo debido a que se cargan instantáneamente con el signo de esta y el elemento empieza a rebotar de placa a placa.

Análisis térmico diferencial: Este método se basa en el análisis del calor debido a los cambios de temperatura de un material, es decir mide las variaciones entálpicas del material a analizar con respecto a una muestra inerte, que no sufre dichos cambios en el rango de temperaturas empleado. La finalidad de este proceso es calentar de manera independiente la muestra y la referencia de acuerdo a los cambios energéticos de estas, y luego compararlos con un patrón establecido. Este proceso no puede ser empleado de manera sistemática, puesto que el análisis debe ser de elemento a elemento y solo es de utilidad si se conoce que todo el grupo es de la misma naturaleza. La verificación de este procedimiento se realizo en el CIAP de la EPN bajo la norma ASTM D3418 a un incremento de temperatura de 10°C/min.

En este procedimiento no se puede analizar el PVC puesto que se degrada a bajas temperaturas y su comportamiento se torna aleatorio. La norma para determinar la estabilidad térmica del PVC se encuentra en la ASTM D2115

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

Debido a los excesos de nuestra sociedad en el pasado y los abusos cometidos contra el medio ambiente, el día de hoy estamos sintiendo, cada vez con mayor fuerza, los efectos de dichos actos en los cambios climáticos y en los desastres naturales que enfrentamos los seres humanos en todas partes del mundo. Por esta razón están creciendo constantemente los movimientos a favor del planeta, presionando a los organismos de control en todo el mundo para que supervisen al máximo la reducción de la contaminación desde la fuente, y exigir la reutilización de materiales de desecho, tanto a empresas como a la sociedad en general.

Según los datos de las empresas dedicadas al aseo de las ciudades en el Ecuador alrededor del 55% de los desperdicios, generados tanto en el sector industrial como en el sector urbano, son plásticos y se reciclan solo el 9% de esta cantidad, el restante 91% de los plásticos no son reutilizados y tienen su destino final en los botaderos, siendo estos elementos los que se degradan con mayor dificultad, alrededor de 30 años, causando un grave daño al ecosistema y por ende al ser humano. A esto se añade que en el 2010 cada persona en Latinoamérica consumió 26 kg de plásticos de diferente tipo.

Es en este punto donde el reciclaje de los plásticos de manera sistematizada a gran escala es indispensable para poder producir materia prima a partir de plásticos de desecho, tema todavía incipiente en el Ecuador debido a la falta de proyectos sustentables en la realidad nacional y por falta de recursos tecnológicos que ayuden en el proceso.

Uno de los principales problemas que se presenta en este campo es la identificación y clasificación de los diferentes tipos de plásticos. Estos elementos rara vez son separados desde la fuente, por lo que se necesita gran cantidad de

mano de obra especializada para identificar y clasificar en el instante previo al proceso de reciclado, acción fundamental, ya que no todos los plásticos se procesan de igual manera. Por esta razón existen ya varios métodos para la identificación automatizada de los plásticos en diferentes partes del mundo minimizando los costos de las empresas dedicadas a este campo y garantizando un buen manejo de los residuos previos a la producción de materia prima, de entre los cuales podemos citar los siguientes, como un ejemplo:

- Separación por diferencia de densidad
- Ensayo sobre punto de fusión
- Luz polarizada
- Espectroscopia infrarroja
- Análisis térmico diferencial
- Análisis ultravioleta o fluorescencia por transmisión
- Análisis por rayos X o rayos gamma

1.2 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA

Actualmente en el Ecuador la identificación, separación y clasificación de los distintos tipos de plásticos se lo realiza de forma manual, lo que representa una alta experiencia y un gran tiempo de capacitación del personal para saber diferenciar entre los diferentes tipos de plástico, más aun si los plásticos a reciclar no llevan grabado la simbología mundialmente acordada.

Tabla 1.1 Código de identificación de plásticos

TERMOPLASTICO	SIMBOLOGIA	REPRESENTACION
Poliétileno tereftalato	PET	
Poliétileno alta densidad	HDPE	
Policloruro de vinilo	PVC	
Poliétileno baja densidad	LDPE	
Polipropileno	PP	
Poliestireno	PS	
Otros	-	

Fuente: Encyclopedia of Polymer Science and Technology, K. Khait

El sistema de separación manual de los plásticos además posee ciertas desventajas de tiempo frente a un sistema automatizado de clasificación, por ejemplo se tiene datos de que la velocidad de una banda transportadora de plásticos para separación manual es de 0.15 m/s con capacidad de 1.77 kg/s, alcanzando una producción de 0.375 Ton/h, mientras que con el sistema automatizado de separación de plásticos, la velocidad de la banda transportadora puede ser de entre 1 m/s a 1.5 m/s, llegando a clasificar 1.5 Ton/h, lo que representa un incremento en la capacidad productiva del 400%. Asociado a esto, otra desventaja que representa la separación manual de plásticos son los costos asociados con la mano de obra, puesto que se suele capacitar a los operadores especializándolos en la identificación de un solo tipo de plástico, y considerando

que existen al menos 6 tipos de plásticos, esto representa una paga mensual de 265 USD para cada trabajador, lo que asciende a 1590 USD para los 6 operarios, con el rango de error propio del hombre, a más de otras complicaciones y gastos, como son las lesiones y los elementos adecuados para el trabajo de cada persona, algo que se suprimiría con la separación automatizada.

La importancia de la separación radica en que si existen otros materiales presentes, estos podrían perjudicar al proceso de reciclaje o directamente empeorar la calidad del producto final, esto debido a que ciertas resinas que componen cada una de las categorías de plástico son termodinámicamente incompatibles unas con otras. Por lo general los residuos de plástico provenientes de la industria son homogéneos y no presentan problemas especiales para su reciclaje, cosa que no ocurre con los residuos domésticos, por lo que deben ser separados en especial el PVC y el PET puesto que presentan un comportamiento térmico/reológico incompatible con el resto. Se conoce que 1 botella de PVC contaminaría 10000 botellas de PET en el proceso de reciclaje

Otro motivo fundamental por lo que es indispensable separar y clasificar los diferentes tipos de plásticos previo al proceso de reciclaje es debido a que cada polímero tiene diferente punto de fusión, lo que causa problemas en el proceso de deshumificación o en la extracción por la diferencia de temperatura requerida para cada material.

Otro campo nuevo e importante que requiere de un sistema eficiente para la identificación de plásticos es la industria de incineración de desechos, puesto que en muchas de las ocasiones pueden existir elementos no identificados al momento de su recolección, y plásticos como el PVC no pueden ser incinerados por la toxicidad que genera la combustión de su compuesto de cloro, lo que causa un gran daño al medio ambiente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar y evaluar la eficacia de los métodos de identificación de plásticos de desecho para la industria del reciclaje, de acuerdo a parámetros preestablecidos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar los diferentes mecanismos de identificación de plásticos.
- Seleccionar los sistemas que mejor se adapte a las necesidades planteadas, técnica, económica y funcionalmente a la industria.
- Combinar los métodos de identificación de plásticos.
- Realizar pruebas para la verificación de la versatilidad de los métodos planteados.
- Elaborar un presupuesto para la ejecución del proyecto.

1.4 ALCANCE

Presentar el análisis de los métodos de identificación de plásticos más idóneos para la implementación en una empresa recicladora de tamaño medio (1000 Kg/día), a través de pruebas y ensayos aplicados a este tipo de empresas y con modernos instrumentos, equipos de acuerdo a la existencia a nivel nacional, así como también de la factibilidad económica conforme a la realidad ecuatoriana.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 TEORIA GENERAL DE LOS PLASTICOS

El término plástico, en su significación más general, se aplica a las sustancias de distintas estructuras y naturalezas que carecen de un punto fijo de ebullición y poseen durante un intervalo de temperaturas propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones.

Los plásticos, en su definición menos ambigua, son materiales sintéticos constituidos por macromoléculas basadas en carbono por la transformación de sustancias naturales a partir de productos extraídos de los hidrocarburos, o mediante la multiplicación artificial de los átomos de carbono en las largas cadenas moleculares de dichos productos. A estas macromoléculas se las conoce como polímeros.

2.1.1 POLIMEROS

Los polímeros son el compuesto químico resultante de la unión de varias moléculas más pequeñas o monómeros. También conocidos como altopolímeros si el número de monómeros es grande, son sustancias con elevado peso molecular y aunque no es estrictamente necesario, puesto que existen polímeros en la naturaleza, se da este nombre de manera general a las sustancias obtenidas por los procesos de síntesis como polimerización.

Un polímero no tiene la necesidad de que todas sus moléculas individuales tengan el mismo peso molecular, la misma composición química y la misma estructura molecular. Hay polímeros como polietileno, polipropileno y PVC que contienen una sola unidad estructural, lo que minimiza irregularidades en el extremo de las

cadena o en sus ramificaciones, a estos se los conoce como homopolímeros, entre las que se incluyen polímeros naturales como proteínas globulares y polímeros de carbohidratos. Pero también existen polímeros que son mezclas de componentes poliméricos homólogos, a los cuales se les designa copolímeros, y en donde cada clase de monómero así como su posición afecta a las características del polímero.

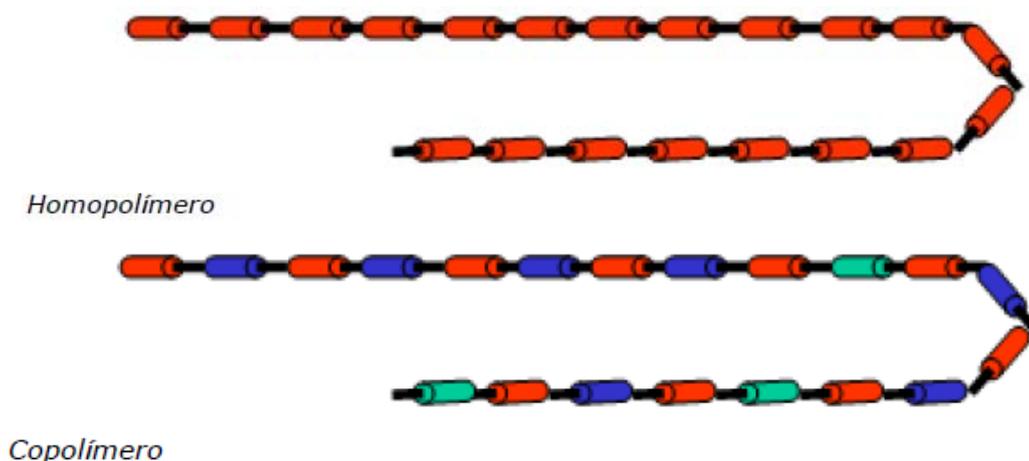


Figura 2.1 Representación de la diferencia entre homopolímero y copolímero

Puesto que los polímeros es la unión de monómeros que pueden tener diferente peso molecular, el peso molecular del polímero se considera la media de los pesos moleculares de las moléculas que lo constituyen. Además, los polímeros comunes de síntesis, al contrario de los naturales, no presentan una estructura ordenada y por consiguiente las propiedades mecánicas del polímero no son nunca del todo homogéneas.

Caso contrario ocurre con los polímeros sintéticos obtenidos empleando catalizadores apropiados (catalizadores estereoespecíficos o de Ziegler-Natta)¹, donde los monómeros se unen entre sí de modo regular dando lugar a los *polímeros isostáticos*

¹ Enciclopedia de la Técnica y Mecánica, Tomo VI

2.1.2 CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS

Los polímeros se clasifican de varias formas:

- Según la manera en que las moléculas son sintetizadas
- En función de su estructura molecular
- Por su familia química

Sin embargo, el método más usado para clasificar los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico, así tenemos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

2.1.2.1 Termoplásticos

Los polímeros termoplásticos se componen de largas cadenas lineales flexibles, retorcidas con enlaces secundarios débiles y entrelazadas entre sí, pero al interior de las cadenas los enlaces comúnmente son covalentes.

Típicamente se comportan de una manera plástica y dúctil, puesto que cuando se aplica una tensión al termoplástico, los enlaces débiles entre cadenas pueden superarse y las cadenas giran y deslizan entre ellas. La facilidad con que las cadenas se deslizan depende de la temperatura y de la estructura del polímero.

A continuación se presenta los termoplásticos más comunes con sus aplicaciones frecuentes

Tabla 2.1 Selección de algunos termoplásticos con sus usos frecuentes

POLIMERO	SIMBOLOGIA	APLICACIONES
Poliétileno	PE	Películas para empaque, aislamiento de conductores, botellas blandas, tuberías
Policloruro de vinilo	PVC	Tuberías, válvulas, acoples, loseta de piso, aislamiento para conductores, techos de vinil para autos
Polipropileno	PP	Tanques, fibras para alfombras, cuerdas, empaques
Poliestireno	PS	Empaques, espumas aislantes, paneles de iluminación, componentes electrónicos, cubetas de huevos
Poliacrilonitrilo	PAN	Fibras textiles, precursor para fibras de carbón, recipientes para alimentos
Polimetilmetacrilato (acrílico-plexiglás)	PMMA	Ventanas, parabrisas, recubrimientos, lentes de contacto rígidos, señalizaciones
Policlorotrifluoroetileno	-	Componentes para válvulas, juntas, tuberías, aislamiento eléctrico
Politetrafluoroetileno (teflón)	PTFE	Sellos, válvulas, recubrimientos no adherentes
Polioximetileno (acetal)	POM	Accesorios de plomería, plumas, cojinetes, engranes, aspas de ventilador
Poliámidas (nylon)	PA	Cojinetes, engranes, fibras, cuerdas, componentes, automotores, componentes eléctricos
Tereftalato de Poliétileno (Poliéster)	PET	Fibras, película fotográfica, cinta de grabación, contenedoras de agua caliente, recipientes para bebidas
Policarbonato	PC	Carcasas eléctricas, componentes automotrices, botellas retornables
Polietereterketona	PEEK	Aislamientos y recubrimientos eléctricos de alta temperatura
Sulfuro de polifenileno	PPS	Recubrimientos, componentes para manejo de fluidos, componentes electrónicos, componentes para secadores de pelo
Sulfona de poliéster	PES	Componentes eléctricos, cafeteras, secadores de pelo, componentes de hornos microondas
Poliamidaimida	PAI	Componentes electrónicos, aplicaciones aeroespaciales y automotrices

Fuente: Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald Askeland, pag 479,482, 483

Bajo la *temperatura de fusión T_m* , el termoplástico se encuentra en estado gomoso o correoso, con estructura amorfa. Justo por debajo del punto de fusión, cuando se aplica tensión al polímero ocurre tanto deformación elástica como plástica. Al eliminar la tensión, se recupera la deformación elástica pero el polímero queda permanentemente deformado.

A temperatura de fusión o por encima de ella las cadenas se deslizan casi sin deformación elástica, la resistencia y el modulo de elasticidad son prácticamente cero y es el punto adecuado para someterlo a procesos de transformación.

A temperaturas muy altas, los enlaces covalentes entre átomos de la cadena lineal pueden destruirse y el polímero puede quemarse o carbonizarse, a lo que se conoce como *temperatura de degradación T_d* . La exposición al oxígeno, a las radiaciones ultravioleta y al ataque por bacterias también hace que un polímero se degrade, incluso a bajas temperaturas.

Hay que destacar que si un termoplástico se enfría por debajo de la temperatura de transición vítrea, la densidad o el modulo de elasticidad cambian a una velocidad diferente. Además muchos termoplásticos cristalizan parcialmente al ser enfriados por debajo de la temperatura de fusión, lo que provoca un incremento brusco de la densidad, en su resistencia al ataque químico y sus propiedades mecánicas

Los termoplásticos se caracterizan porque al ser calentados a temperaturas elevadas, estos polímeros se ablandan y se conforman por flujo viscoso. Los polímeros termoplásticos se pueden reciclar con facilidad.

Tabla 2.2 Temperatura de fusión para algunos termoplásticos seleccionados

POLIMERO	SIMBOLOGIA	PUNTO DE FUSION [°C]
Tereftalato de Polietileno (Poliéster)	PET	255
Polietileno de Alta Densidad	HDPE	137
Polietileno de Baja Densidad	LDPE	115
Policloruro de vinilo	PVC	175-212
Polipropileno	PP	168-176
Poliestireno	PS	240
Poliacrilonitrilo	PAN	320
Politetrafluoroetileno (teflón)	PTFE	327
Policlorotrifluoroetileno	-	220
Polimetilmetacrilato (acrílico-plexiglás)	PMMA	220
ABS	-	-
Polioximetileno (acetal)	POM	181
Poliamida (nylon)	PA	265
Acetato de celulosa	-	230
Policarbonato	PC	230

Fuente: Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald Askeland,

2.1.2.2 Termoestables

Están compuestos por largas cadenas de moléculas con fuertes enlaces reticulares o entrecruzamientos entre las cadenas para formar redes tridimensionales. Por esta razón, estos polímeros poseen buena resistencia, rigidez y dureza, ya que las cadenas no pueden girar ni deslizarse. Sin embargo, tienen baja ductilidad y propiedades al impacto y una alta temperatura de transición vítrea.

Son polímeros que no tienen temperatura de fusión, y debido a que el proceso de entrecruzamiento no es reversible es difícil reprocesarlos o reciclarlos de manera conveniente.

Entre los polímeros termoestables más conocidos tenemos los siguientes con sus usos comunes:

Tabla 2.3 Selección de algunos termoestables con sus usos frecuentes

POLIMERO	SIMBOLOGIA	APLICACIONES
Fenólicos	-	Adhesivos, recubrimientos laminados
Aminas	-	Adhesivos, utensilios de cocina, moldes eléctricos
Poliésteres	-	Moldes eléctricos, laminados decorativos, matriz en compuestos reforzados con fibra de vidrio
Epóxicos	-	Adhesivos, moldes eléctricos, matrices para materiales compuestos
Poliuretano	PU	Fibras (parachoques, embragues), recubrimientos, espumas, aislamiento
Silicona	-	Adhesivos, juntas, selladores

Fuente: Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald Askeland, pag 494

2.1.2.3 Elastómeros

Los elastómeros tienen una estructura intermedia entre los termoplásticos y los termoestables, en la cual se permite que ocurra una ligera formación de enlaces reticulares entre cadenas.

Los elastómeros son polímeros lineales naturales ó sintéticos y presentan gran cantidad de deformación elástica al aplicarles una fuerza. Bandas elásticas, ruedas de automóviles, mangueras y aislamiento para conductores eléctricos son los usos más comunes.

En muchos casos los elastómeros pueden tener gran deformación elástica, pero produciendo una deformación plástica no recuperable del todo, por lo cual se suele utilizar entrecruzamientos, empleando átomos de azufre, de entre el 0.5% al 5%) para enlazar cadenas de polímeros. Los pasos de la formación de puntos de entrecruzamiento pueden incluir el reacomodo de una tomo de hidrogeno y el reemplazo de algunos enlaces dobles por enlaces sencillos.

El proceso de entrecruzamiento no es reversible, y en consecuencia el elastómero no es fácilmente reciclable.

Tabla 2.4 Selección de algunos elastómeros con sus usos frecuentes

POLIMERO	SIMBOLOGIA	APLICACIONES
Poliisopreno	-	Llantas
Polibutaideno	-	Llantas industriales, montajes contra vibración
Poliisobutileno	-	Tubería, aislamiento, recubrimientos
Policloropreno (neopreno)	-	Mangueras, recubrimiento para cable
Butadieno-estireno (caucho BS o SBR)	-	Llantas
Butadieno-acrilonitrilo	-	Juntas, mangueras para combustible
Silicona	-	Juntas, sellos

Fuente: Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald Askeland, pag 491

2.1.3 POLIMERIZACION

La polimerización son reacciones químicas que conducen a la formación de altopolímeros o macromoléculas como consecuencia de la unión de moléculas conocidas como monómeros que ostentan enlaces insaturados. Los monómeros de partida pueden ser iguales como es el caso del etileno que polimeriza en polietileno (PE), el estireno en poliestireno (PS) o el cloruro de vinilo en policloruro de vinilo (PVC), así como también pueden ser diferentes como el copolímero de estireno-acrilonitrilo (SAN), copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).

Existen diferentes clases de polimerización de acuerdo a las características físicas y químicas de las moléculas que se desea polimerizar y el tipo de polímero a obtener, de entre los cuales se adoptan los nombres de polimerización por adición y polimerización por condensación. Mientras que en la industria se los clasifica a los procesos de la siguiente manera: polimerización en masa, polimerización en solución, polimerización en emulsión y polimerización en suspensión

2.1.3.1 Polimerización por adición

También llamada crecimiento por etapas, ocurre por la formación de radicales libres en el monómero original para su posterior adición a la cadena, que como en el caso del etileno puede ser por la ruptura de su enlace covalente doble entre átomos de carbono no saturado en presencia de una combinación apropiada de calor, presión y catalizadores, y así los átomos de carbono se convierten en radicales activos para luego unirse por un enlace sencillo, donde pueden compartir un electrón libre con otro átomo de carbono, y de esta manera se pueden agregar otras unidades de repetición.

Para dar inicio a la formación de radicales libres en los monómeros se debe añadir a estos un iniciador que frecuentemente son peróxidos, lo que implica que reaccionen entre sí además de reaccionar con el monómeros, y por lo tanto sus vidas son relativamente cortas. Un iniciador común es el peróxido de benzoílo.

Otra forma de formar radicales libres es a través del desplazamiento de átomos de hidrogeno como es el caso de poliadición entre moléculas de glicol y un disocianato para dar lugar a la formación de poliuretano.

Es importante señalar que la característica principal de la poliadición es no presentar eliminación de moléculas sencillas como agua, hidrácidos, etc.

2.1.3.2 Polimerización por condensación

Similar a la poliadición en su conjunto, la polimerización por condensación o de crecimiento por pasos difiere en que requiere que por lo menos dos grupos funcionales distintos participen en la reacción, es decir que existan dos grupos de moléculas con diferente número de sitios en donde otras puedan fijarse, pudiendo estar contenidos o no en la misma unidad monomérica. Si las moléculas son diferentes no es necesario que se diferencien en sus grupos reactivos.

La policondensación simultáneamente a la formación de altopolímeros elimina pequeñas moléculas como anhídrido carbónico, aldehído fórmico o agua. A este grupo pertenece el poliéster formado por los monómeros etilenglicol y dimetiltereftalato generando alcohol metílico como subproducto.

2.1.3.3 Polimerización en maza

Es una reacción que tiene lugar sin adición de solventes, pero sí de catalizadores químicos o de alta energía de radiación, operando sobre monómeros líquidos o calentados hasta su punto de fusión. Este tipo de polimerización es limitado esencialmente por la dificultad de regular uniformemente la temperatura de la masa evitando sobrecalentamientos locales, lo que es especialmente sensible cuando el polímero que se forma es soluble en el exceso de monómero, por lo cual la masa reaccionante se vuelve cada vez mas viscosa, y la irregularidad de las reacciones.

Si el proceso va a ser por condensación se requiere ir eliminando las moléculas que se forman en los subproductos, lo que se consigue operando al vacío, sin ser este demasiado profundo para evitar que se destilen también los monómeros.

Los polímeros obtenidos por este procedimiento tienen óptimas cualidades ópticas.

2.1.3.4 Polimerización en solución

Este método se efectúa operando sobre monómeros disueltos en solventes adecuados que evitan los problemas derivados con la reacción exotérmica. A pesar de ciertas desventajas como menor velocidad de reacción, necesidad de grandes cantidades de solventes o la posibilidad de que el solvente interfiera en la reacción, este método presenta la gran ventaja de permitir que la reacción se desarrolle a temperatura moderada, ya que no sobrepasa el punto de ebullición del solvente, lo que lo hace muy sensible y controlable, aunque crea el posterior problema de la separación del solvente.

Este método también arroja como resultado polímeros con el menor peso molecular en comparación del resto de procesos.

2.1.3.5 Polimerización en emulsión

Este proceso se efectúa emulsionando el monómero en agua con adición de un agente tensoactivo, es decir de sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases.

La reacción de polimerización se inicia en el interior de las gotas del monómero, disueltos en el emulsionante bajo la acción de los catalizadores; las cadenas de polímero que se forman, salen de la gota para reaccionar con moléculas del polímero que se encuentra en disolución en el agua.

La polimerización en emulsión no es utilizable para la reacción de condensación en la que hay que manejar diversos monómeros con características distintas.

Los polímeros obtenidos por este proceso contienen impurezas causadas por restos de emulsionantes que es muy complicado expulsar, y que perjudican a las propiedades ópticas y eléctricas de estos productos.

2.1.3.6 Polimerización en suspensión

Se la conoce como polimerización por suspensión puesto que se realiza en el agua, y como el monómero y polímero que se obtiene de él son insolubles en agua, se obtiene una suspensión.

También llamada polimerización en suspensión acuosa o en perlas, difiere de la de emulsión por el hecho de que la dispersión del monómero se hace sin el auxilio de agentes tensoactivos. Además los catalizadores solo deben ser los solubles en el monómero y no en el agua, por lo que toda la reacción se produce al interior de las gotas del monómero aisladas entre sí por agentes estabilizantes.

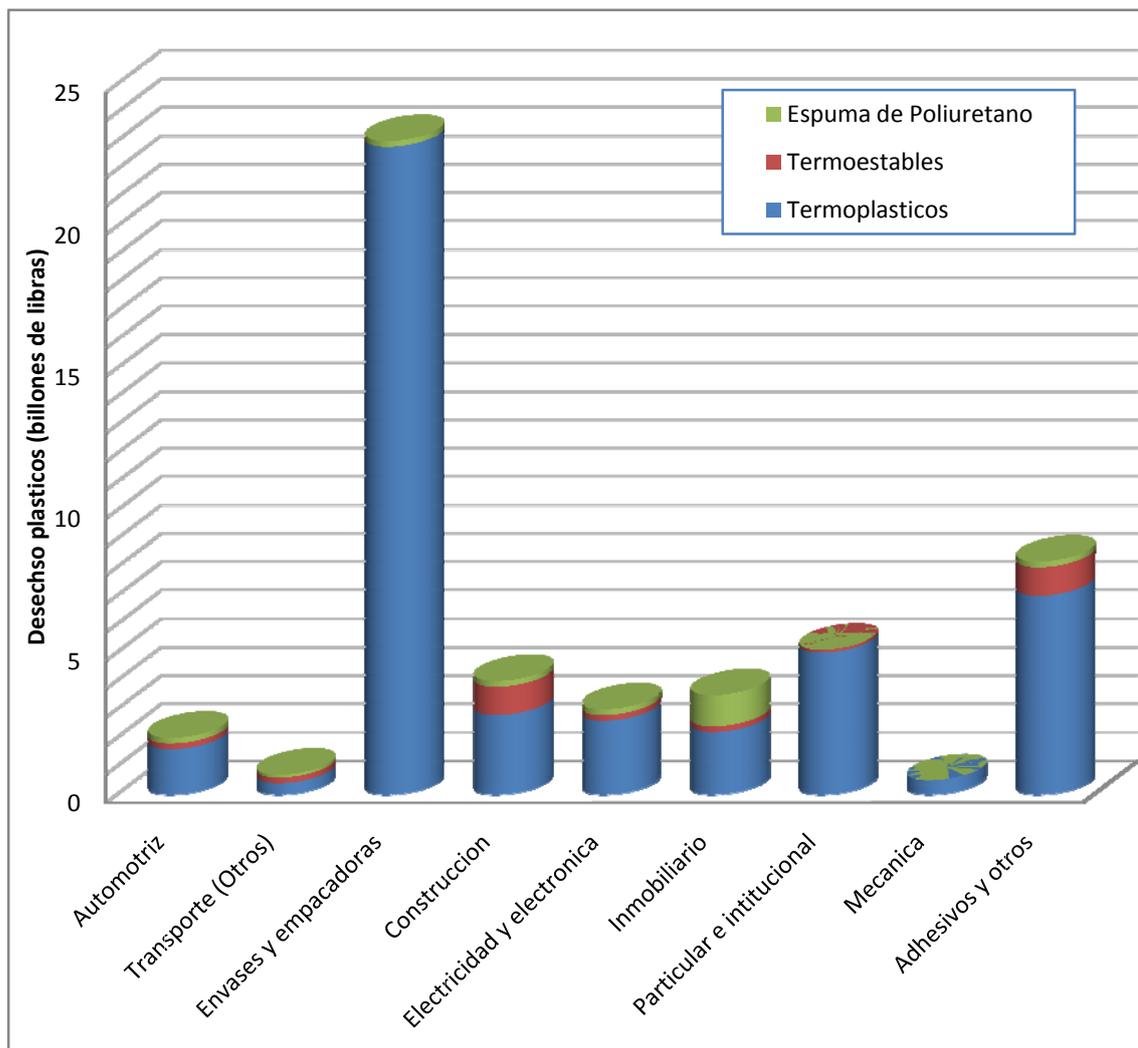
Terminado el proceso de polimerización, las perlas pueden ser lavadas para retirar sus impurezas.

La polimerización en suspensión resulta análoga a la polimerización en masa, con la gran ventaja de poder desarrollarse a más baja temperatura y sin peligro de sobrecalentamiento, aunque tiene la desventaja de que tampoco puede utilizarse en los procesos de policondensación.

2.2 PLASTICOS UTILIZADOS EN EL RECICLAJE

Los únicos plásticos que son susceptibles de reciclaje son los polímeros termoplásticos por las características de sus cadenas y entrecruzamientos. Además esta condición no se contrapone con la realidad de las industrias, ya que dichos polímeros termoplásticos son los desechos más representativos de los diferentes sectores productivos, y por consiguiente son los más demandados para su reposición.

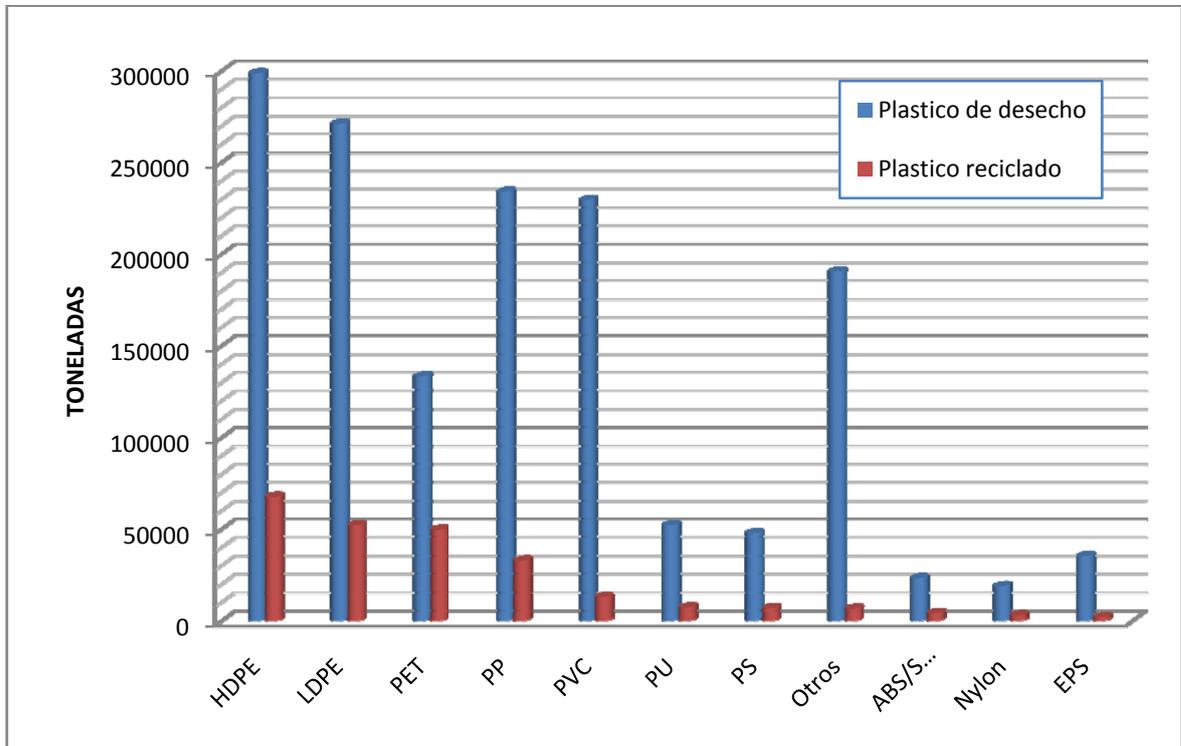
Graf. 2.1 Plásticos de desecho en la industria de U.S, año 2000



Fuente: Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy,
www.ornl.gov/info/reports/1989/3445603282472.pdf

Además en países que poseen una avanzada industria del reciclaje se tiene un porcentaje estimado de la cantidad que se recicla en relación a la cantidad de desecho que existe para cada tipo de polímero. Es así que en Australia se tienen las siguientes estadísticas para el 2006:

Graf. 2.2 Plásticos de desecho vs. Plástico reciclado en Australia año 2006



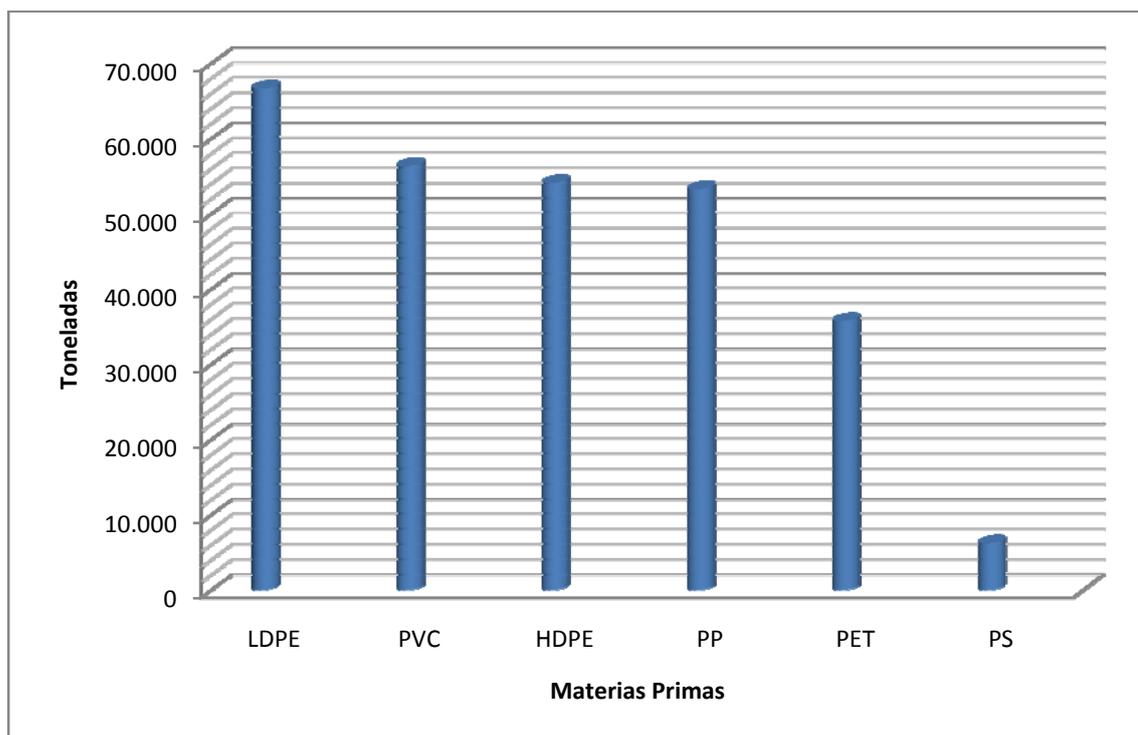
Fuente: B&R Industries, www.petplastic.net

En donde se puede observar que los polímeros más reciclados son el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE), el poliéster (PET), el polipropileno (PP), el policloruro de vinilo (PVC), el poliuretano (PU) y el poliestireno (PS). Lo que ratifica que los termoplásticos comunes o simples son los más rentables para la industria del reciclaje.

Es importante señalar también que para que la industria del reciclaje tenga éxito en cualquier parte del mundo, es necesario que existan empresas capacitadas para procesar el plástico reciclado para la producción de nuevos productos y de esta manera cerrar el círculo de todo el proceso de reciclaje. Además cabe señalar que la empresa de recolección y separación de plásticos puede o no formar parte de la empresa productora de productos plásticos.

Es así que se presenta la siguiente grafica de la cantidad de plástico importado como materia prima por el Ecuador en el 2008, suponiendo que existe proporcional capacidad instalada en el país para procesar dichos polímeros.

Graf. 2.3 Polímeros importados por Ecuador en el año 2008



Fuente: Asociación Ecuatoriana de Plásticos, www.aseplas.org

Por los criterios expuestos anteriormente el estudio y la posterior determinación de los métodos de selección de plásticos se enfocara exclusivamente a los plásticos termoplásticos, con preferencia a los que consume el país, dejando de lado los termoestables y los elastómeros.

2.3 CARACTERISTICAS DE LOS PLASTICOS UTILIZADOS EN EL RECICLAJE

Debido a que nuestro estudio, por las razones que se menciono anteriormente, se enfocara a los 6 termoplásticos principales, pudiéndose incluir PU y ABS, a continuación se presentan las características básicas para cada uno.

2.3.1 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)

Producido comercialmente por primera vez en el Reino Unido en 1939 mediante reactores autoclave o tubulares necesitó presiones de 14.500 psi (100 Mpa) y una temperatura 300 °C, el polietileno de baja densidad es un material blanquecino, transparente a translucido, flexible, y es frecuentemente fabricado en laminas, pudiendo utilizar colorantes posteriormente para los diversas aplicaciones.

Por ser producto de la polimerización del etileno puro en estado gaseoso, tiene una estructura química fundamental $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ formando una cadena enramada con ramificaciones largas, con enlaces dobles y una pequeña cantidad de oxígeno combinado con propiedades químicas de un alcano con peso molecular elevado.

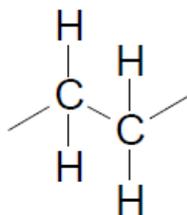


Figura 2.2 Estructura fundamental del polietileno²

La formación ramificada del LDPE influye enormemente en sus características, ya sea se encuentre este en estado sólido o fundido. Un polietileno no ramificado es casi completamente cristalino y tiene un punto de fusión relativamente alto, mientras que al aumentar la ramificación de la cadena disminuye la densidad y su grado de cristalinidad.

² www.journeytoforever.org/biofuel_library/plasticsidentification.pdf

De las propiedades que son función de la cristalinidad, y por consiguiente del grado de ramificación están: la dureza, el punto de reblandecimiento y el punto de cedencia por la tracción. Mientras que otras propiedades, como la resistencia a la tracción, la flexibilidad a temperaturas bajas y la resistencia al choque, son principalmente funciones del peso molecular medio. El grado de ramificación puede variarse con la variación en los procesos de polimerización, independiente del peso molecular del monómero.

Tabla 2.5 Propiedades/Características del LDPE

CARACTERISTICAS LDPE	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	82 - 100 °C
Mínima temperatura de trabajo	-30 °C
Temperatura de fusión	125 - 136 °C
Resistencia a la tensión	6.20 - 17.23 Mpa
Modulo de tensión	137.89 - 186.15 Mpa
Resistencia al impacto	NB
Densidad	910 - 930 kg/m ³
Elongación	600% - 650%
Dureza	SD55
Absorción de agua	0.001 - 0.015%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Pobre
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Bueno
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Excelente

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

Entre los principales usos del LDPE después de su reciclado son las bolsas de plástico para la basura, tuberías de riego para aplicaciones agroindustriales o madera plástica para mobiliario.

2.3.1.1 Polietileno de baja densidad lineal (LLDPE)

Sobre 1976 se desarrolló un nuevo proceso simplificado a baja presión para la producción de polietileno, el cual utiliza una presión de 100 a 300 psi (0,7 a 2 Mpa) y una temperatura de unos 100 °C. El polietileno producido puede describirse como un polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y tiene una estructura de

cadena lineal con ramificaciones laterales cortas e inclinadas, lo que le otorga una densidad y un grado de cristalinidad mayor que el LDPE, pero sigue manteniendo la misma estructura fundamental que este.

El LLDPE es un polímero rígido, pues a pesar de tener un proceso de polimerización similar al de LDPE, y tener ciertas propiedades similares, se diferencia de este por ser un copolímero con la inclusión del buteno, hexeno y octeno, lo que modifica las propiedades al tener mayor resistencia a la tensión, al rasgado y a la perforación, mayor resistencia al impacto, y resiste mejor a acciones del ambiente. Aunque también tiene desventajas, pues es más difícil de procesar, y tiene menor calidad en el acabado superficial.

Tabla 2.6 Propiedades/Características del LLDPE

CARACTERISTICAS LLDPE	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	77 °C
Mínima temperatura de trabajo	-48 °C
Temperatura de fusión	122 - 127 °C
Resistencia a la tensión	8 - 20 Mpa
Modulo de tensión	-
Resistencia al impacto	-
Densidad	911 - 943 kg/m ³
Elongación	500% - 900%
Dureza	SD52
Absorción de agua	0.01%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Pobre
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Bueno
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Excelente

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

Entre los usos más frecuentes de este polímero están: bolsas para pañal, costales para productos a granel, costales de uso pesado, bolsas de basura, geomembranas y películas para empaques de comida.

2.3.2 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

Formado a partir de la misma estructura fundamental de los dos anteriores, por lo que comparte similares características como ser translucido pero menos opaco, esta clase de polietileno es de estructura lineal no ramificada, y posee mayor cristalinidad que el LDPE, lo que lo convierte en un polietileno, más rígido, duro, fuerte, y un poco más pesado que los dos anteriores, pero menos dúctil.

Fue producido comercialmente en 1956, donde mediante los procesos de Philips y Ziegler donde se utilizó un catalizador especial. Las presiones de este proceso son inferiores a las del LDPE pero mayores a las utilizadas en el LLDPE, que van desde los 250 psi a 580 psi (2 a 4 Mpa), con una temperatura de entre 100 a 150°C

Tabla 2.7 Propiedades/Características del HDPE

CARACTERISTICAS LDPE	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	79 – 121 °C
Mínima temperatura de trabajo	-30 °C
Temperatura de fusión	137 °C
Resistencia a la tensión	19.99 – 37.23 Mpa
Modulo de tensión	137.89 - 186.15 Mpa
Resistencia al impacto	0.21 – 7.47 J/cm
Densidad	950 – 960 kg/m ³
Elongación	180% - 1000%
Dureza	SD65
Absorción de agua	0.01%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Buena
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Buena
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Excelente

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

2.3.3 POLICLORURO DE VINILO (PVC)

Se elabora por la adición repetida del cloruro de vinilo monómero (CVM), de fórmula $\text{CH}_2=\text{CHCl}$, mediante polimerización en suspensión y polimerización por emulsión, formando cadenas lineales de elevado peso molecular con estructura cabeza-cola. El PVC tiene la misma estructura que el polietileno, con la diferencia que tiene presencia de cloro, elemento que representa el 75% del peso de la resina pura del polímero.

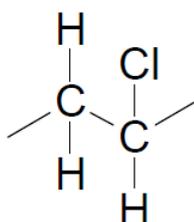


Figura 2.3 Estructura fundamental del policloruro de vinilo³

El PVC puro es un material rígido, duro, cornea, ininflamable cuyas propiedades son la resistencia mecánica, una buena resistencia a la intemperie, la resistencia al agua y a los químicos y el aislamiento eléctrico. Mientras que entre sus desventajas esta su relativa inestabilidad al calor y a la luz, sobre todo la UV, ya que le causan una pérdida de cloro en forma de cloruro de hidrógeno (HCl). Esto se evita industrialmente por la adicción de estabilizadores como sales de plomo, bario, calcio o cadmio, así como también compuestos organoestánicos.

Además de los estabilizadores, se pueden añadir compuestos de bajo peso molecular, llamados plastificantes, para modificar las propiedades mecánicas del PVC. Entre los plastificantes más comunes están: los ésteres de ácidos orgánicos, que son ácidos orgánicos que fueron reemplazados su átomo de hidrógeno por un grupo orgánico. También algunos de estos aditivos al PVC se los requiere para poder facilitar su maquinado.

³ www.journeytoforever.org/biofuel_library/plasticsidentification.pdf

Debido a la variedad de compuestos que se utilizan para la producción del PVC con sus diferentes características, puede separarse en “PVC rígido”, que representa casi las dos terceras partes de su uso total, y en “PVC flexible” que es el porcentaje restantes.

La producción a nivel mundial de PVC en el año 2000 fue más de 20 millones de toneladas anuales (con un incremento anual de entre el 2% y el 10%), lo que corresponde a una quinta parte de la producción total de plástico. Situándolo entre los plásticos de mayor importancia.

El PVC es uno de los plásticos que mayor cantidad de sustancias tóxicas contiene, siendo dañinos, tanto para el hombre como para el medio ambiente, en su producción como en su eliminación.

A continuación se presentan algunas de las propiedades del PVC rígido:

Tabla 2.8 Propiedades/Características del PVC

CARACTERISTICAS PVC	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	66 - 79 °C
Mínima temperatura de trabajo	-10 °C
Temperatura de fusión	175 - 212 °C
Resistencia a la tensión	34.47 - 55.15 Mpa
Modulo de tensión	2068.42 - 3447.37 Mpa
Resistencia al impacto	0.26 - 10.67 J/cm
Densidad	1300 - 1500 kg/m ³
Elongación	2% - 40%
Dureza	R110
Absorción de agua	0.07% - 0.4%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Pobre
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Excelente
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Buena

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

2.3.4 POLIPROPILENO (PP)

Estructuralmente el polipropileno es un polímero vinílico, similar al polietileno, con la diferencia que uno de los carbonos de la unidad monomérica está enlazado con un grupo metilo CH_3 , y es producido generalmente por suspensión.

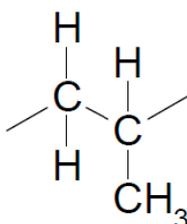


Figura 2.4 Estructura fundamental del polipropileno⁴

Cuando estos grupos de metilo se encuentran en un mismo lado de la con respecto a los átomos de carbono, se dice que es un *polipropileno isotáctico*, mientras que si dichos grupos metilo están alternados en su posición con respecto al átomo de carbono se conoce como *polipropileno sindiotáctico*, y si no tienen ningún orden aparente se le llama *polipropileno atáctico*. Las propiedades del polipropileno dependen en gran número de la tacticidad del mismo, siendo el isotáctico el más utilizado.

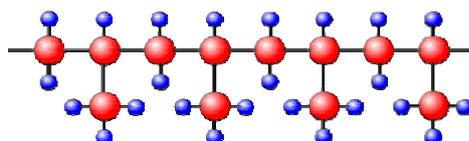


Fig. 2.5 Polipropileno isotáctico⁵

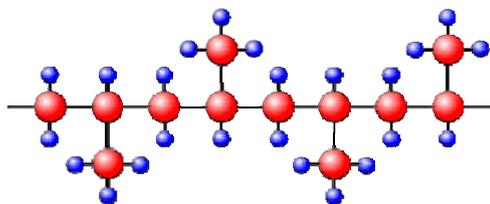


Fig. 2.6 Polipropileno sindiotáctico⁵

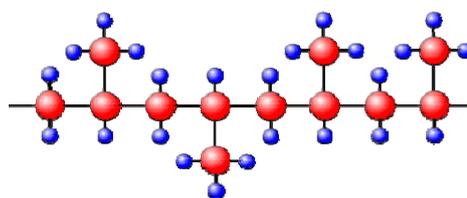


Fig. 2.7 Polipropileno atáctico⁵

⁴ www.journeytoforever.org/biofuel_library/plasticsidentification.pdf

⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno>

El polipropileno a pesar de ser un homopolímero, puede ser concebido como copolímero cuando se le inyecta PE para que se polimerice junto al PP al mismo tiempo, dando como resultado cadenas en donde ambos monómeros se alternan de manera aleatoria, y se lo conoce como *PP copolímero estadístico*. Pero también existe el PP copolímero en bloques, en donde primero se polimeriza el PP, para luego añadir PE en otro reactor para que se polimerice sobre el polipropileno.

Se estima que la demanda mundial del polipropileno asciende a 40 millones de toneladas al año, con un incremento del 10% anual, que para beneficio de la industria del reciclaje es el polímero completamente inerte, totalmente reciclable, su incineración no produce ningún contaminante al medio ambiente y su tecnología de producción es la de menos impacto ambiental.

El polipropileno es uno de los polímeros más versátiles, debido a que puede ser utilizado como plástico o como fibra, es de apariencia transparente y ofrece gran resistencia mecánica.

Tabla 2.9 Propiedades/Características del PP homopolímero

CARACTERISTICAS PP homopolímero	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	107 - 149 °C
Mínima temperatura de trabajo	-10 °C
Temperatura de fusión	168 °C
Resistencia a la tensión	31.02 - 41.36 Mpa
Modulo de tensión	1103.16 - 2068.42 Mpa
Resistencia al impacto	0.21 - 0.64 J/cm
Densidad	900 – 910 kg/m ³
Elongación	500% - 800%
Dureza	R95
Absorción de agua	0.01%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Buena
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Excelente
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Buena

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

Tabla 2.10 Propiedades/Características del PP copolimero

CARACTERISTICAS PP COPOLIMERO	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	88 - 116 °C
Mínima temperatura de trabajo	-10 °C
Temperatura de fusión	165 °C
Resistencia a la tensión	27.57 – 37.92 Mpa
Modulo de tensión	689.47 – 1172.10 Mpa
Resistencia al impacto	0.58 – 6.40 J/cm
Densidad	890 – 910 kg/m ³
Elongación	200% - 700%
Dureza	R80
Absorción de agua	0.01%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Buena
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Buena
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Buena

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

2.3.5 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

De cadena lineal con un alto grado de cristalinidad, este polímero fue descubierto en 1941 y producido comercialmente por primera vez en 1946 en fibras textiles. Hoy en día es el polímero para el cual los fabricantes de maquinas internacionales han dedicado mayor esfuerzo técnico y comercial.

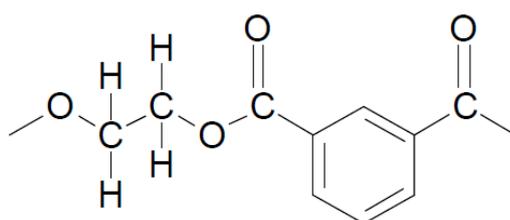


Fig. 2.8 Estructura fundamental del tereftalato de polietileno⁶

Muy utilizado en envases de bebidas y textiles, es un polímero que se obtiene como resultado de la policondensación del ácido tereftálico (ácido orgánico polibásico) y el etilenglicol (alcohol polioxidrilico) en fase fundida continua a 200°C aproximadamente, y aunque puede causar confusión este elemento no pertenece

⁶ www.journeytoforever.org/biofuel_library/plasticsidentification.pdf

al grupo de los polietilenos sino al de los poliésteres aromáticos, hecho por el cual debe ser secado y deshumificado hasta un 0.005% inmediatamente después de su polimerización para no permitir que pierda sus propiedades en el mecanizado.

Entre sus propiedades están su brillos y transparencia con efecto lupa, excelentes propiedades mecánicas, barrera a los gases, esterilizable cuando es virgen, liviano, estabilidad dimensional y lo más importante es que a nivel mundial esta rankeado como número uno en reciclable, con el plus de que es el polímero con menos fluctuaciones con respecto a los costos, pero con la desventaja de que el PET reciclado no puede ser utilizado nuevamente en envases alimenticios, por no permitir la esterilización del producto, por tener una temperatura de transición vítrea baja

Tabla 2.11 Propiedades/Características del PET

CARACTERISTICAS PET	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	79 °C
Mínima temperatura de trabajo	-40 °C
Temperatura de fusión	120 °C
Resistencia a la tensión	71.70 Mpa
Modulo de tensión	-
Resistencia al impacto	0.42 J/cm
Densidad	1370 kg/m ³
Elongación	130%
Dureza	SD55
Absorción de agua	0.01%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Pobre
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Buena
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Excelente

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

2.3.6 POLIESTIRENO (PS)

El poliestireno es un polímero vinílico con grupos fenilo unidos cada dos átomos de carbono, tiene cadenas lineales $C_6H_5 - CH = CH_2$, y se produce por la polimerización del estireno, produciendo gran cantidad de calor que debe sustraerse para controlar el proceso. La polimerización del estireno se puede realizar por varios métodos, pero la elección del mismo es determinado por las características deseadas en el producto y por factores económicos.

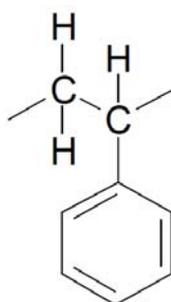


Fig. 2.9 Estructura fundamental del poliestireno⁷

El poliestireno comercial en estado puro, al cual se lo denomina PS cristal es inodoro, límpido, dotado de óptima transparencia y elevado índice de refracción, con reducido peso específico, otorga facilidad de trabajo y estabilidad de dimensiones. Aunque entre sus características negativas están su fragilidad, bajo punto de reblandecimiento, inflamabilidad, solubilidad en hidrocarburos aromáticos, en solventes clorurados y en esteres y cetonas, se recubre do polvo con facilidad, y baja resistencia a los rayos UV; todos estos problemas se los soluciona con la adición de otros elementos o produciéndolos como copolímeros, en donde se pueden destacar los siguientes: el poliestireno de alto impacto, resistente y opaco, el poliestireno expandido, muy ligero, y el poliestireno extrusionado, similar al expandido pero más denso e impermeable.

Este termoplástico es apto para trabajar por estampación a inyección, por extrusión, por extrusión y estirado, por soplado, por compresión y puede hilarse

⁷ www.journeytoforever.org/biofuel_library/plasticsidentification.pdf

para obtener fibras textiles. Con una demanda mundial de unos 13 millones de toneladas en el año 2000, el poliestireno es hoy el cuarto plástico más consumido, por detrás del polietileno, el polipropileno y el PVC.

Tabla 2.12 Propiedades/Características del PS cristal

CARACTERISTICAS PS CRISTAL	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	66 - 77 °C
Mínima temperatura de trabajo	-10 °C
Temperatura de fusión	240 °C
Resistencia a la tensión	41.85 – 50.33 Mpa
Modulo de tensión	3102.64 Mpa
Resistencia al impacto	0.16 J/cm
Densidad	1040 – 1070 kg/m ³
Elongación	2.8% - 4%
Dureza	R65
Absorción de agua	0.1%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Buena
Soldabilidad Ultrasónica	Pobre
Resistencia a ácidos	Buena
Resistencia a los alcalinos	Buena
Resistencia a los solventes	Buena

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

Tabla 2.13 Propiedades/Características del PS alto impacto

CARACTERISTICAS PS ALTO IMPACTO	
Máxima temperatura de trabajo (sin carga)	60 - 79 °C
Mínima temperatura de trabajo	-40 °C
Temperatura de fusión	85 °C
Resistencia a la tensión	19.30 – 31.75 Mpa
Modulo de tensión	1999.48 – 2757.90 Mpa
Resistencia al impacto	0.37- 0.53 J/cm
Densidad	1040 – 1070 kg/m ³
Elongación	25% - 60%
Dureza	R65
Absorción de agua	0.1%
Resistencia UV	Pobre
Maquinabilidad	Buena
Soldabilidad Ultrasónica	Buena
Resistencia a ácidos	Buena
Resistencia a los alcalinos	Excelente
Resistencia a los solventes	Pobre

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

2.4 METODOS DE IDENTIFICACION DE PLASTICOS

Los métodos de clasificación de plásticos se pueden dividir en dos grandes grupos, la macroclasificación y la microclasificación.

La macroclasificación trabaja con los elementos en su forma y tamaño originales, sin ningún tipo de procesamiento previo, como pueden ser botellas o contenedores. En este tipo de clasificación se utilizan con mayor eficacia la espectroscopia infrarroja, rayos X, identificación por laser, y tiene la ventaja de que no requiere de mucho entrenamiento previo. Este es el tipo de clasificación del cual existen maquinas disponibles en el mercado que se las puede encontrar con mayor facilidad.

A diferencia de la anterior, la microclasificación se centra en los procesos de identificación aplicables después de que el material haya sido triturado o cortado en pedazos como lo son los métodos de flotación y hundimiento, y la disolución selectiva. La ventaja de este tipo de clasificación es que se reducen los costos de transporte y se pueden trabajar mayores cantidades.

2.4.1 MACROCLASIFICACION

2.4.1.1 Espectroscopia

La espectroscopia cercana a la infrarroja es uno de los métodos que mejores resultados ha tenido en la clasificación de los plásticos de desecho, aunque compleja. Esta técnica se efectúa irradiando ondas electromagnéticas del infrarrojo cercano (vibración-rotación molecular), con longitud de onda de entre 800 a 2500 nanómetros⁸, a la superficie de los elementos a clasificar, que a través de sensores se logra medir la cantidad de luz absorbida y por consiguiente reflejada por cada tipo polímero en diferentes frecuencias, y que se representa por

⁸ Automated Sorting of Plastics for Recycling, Edward A Bruno;
http://webmail.fq.edu.uy/~organica/org104/org104_ir_1.pdf

una grafica computarizada, que al compararlo con la medida de un polímero conocido se puede conocer la clase del polímero.

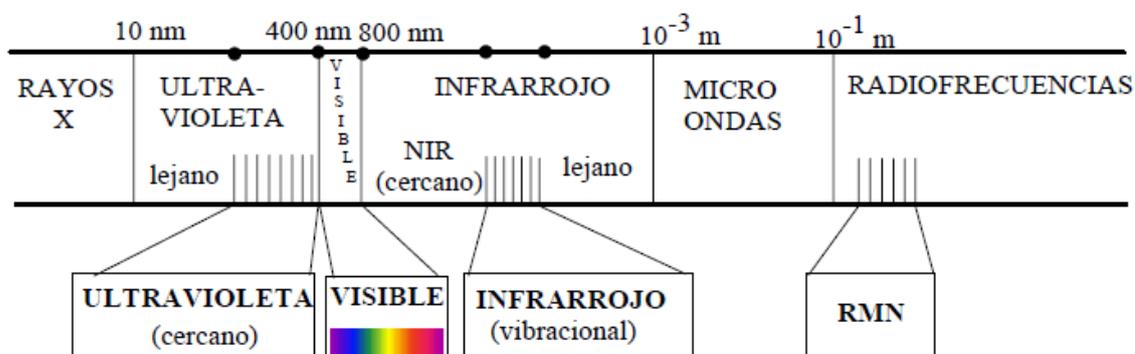


Figura 2.10 Espectro electromagnético⁹

Este método se basa en que toda molécula poliatómica tiene diferente grado de libertad que representa su vibración natural que dan bandas naturales en el IR:

$$\begin{aligned} \text{vibracion natural} &= 3N - 6 && \text{y;} \\ \text{vibracion natural} &= 3N - 5 && \text{si es lineal} \end{aligned} \quad 2.1$$

Donde N es el número de átomos de la molécula.

De entre las ventajas de este método esta que se logra identificar los plásticos en tiempo real a gran velocidad, pudiendo tomar varias mediciones de un solo objeto en un pequeño lapso de tiempo, garantizando la eficacia del proceso además de que procesa mayor volumen de plásticos. Es más, la parte que toma más tiempo en este método es el análisis de los datos obtenidos, lo cual puede ser realizado mediante varios métodos. Otra ventaja es que elementos como suciedad, polvo, o hasta las propias etiquetas de los envases no interfieren en las lecturas, así como tampoco son afectadas por el color del material, excepto por el negro que puede absorber gran cantidad de luz infrarroja, aunque compañías como Bruker

⁹ http://webmail.fq.edu.uy/~organica/org104/org104_ir_1.pdf

Instruments Incorporated producen maquinas que pueden identificar el plástico en tonalidad negra.

Según The Society of Plastics Industry Inc. En 1996 se podían describir dos diferentes procedimientos para identificar el plástico mezclado dentro de las maquinas que se pueden encontrar en el mercado como Magnetic Separation System's BottleSort system y Automation Industrial Control's Poly-Sort system

En estas maquinas utilizados para botellas o contenedores, comienzan con mecanismos que diferencian los tamaños, además de que eliminan las impurezas y los contaminantes de los plásticos. El segundo paso son sistemas mecánicos y chorros de aire o por vibración que ordenan a todos los elementos en línea para dejarlos en cintas transportadoras de alta aceleración, que los lleva hacia la unidad de identificación donde ráfagas infrarrojas toman miles de lecturas.

En el primer procedimiento la maquina procesa a las resinas similares como una sola, lo que facilita la clasificación de los polímeros y reduce la posibilidad de error. La clasificación de este sistema los selecciona en tres grandes grupos que son: PET y PVC, HDPE sin pigmentación y PP, y HDPE con coloración, permitiendo un clasificación a mayor velocidad para complementarlo posteriormente con métodos complementarios. De estos métodos complementarios, se utiliza uno similar al original, para separar el PET claro del pigmentado, y separar el HDPE del PP, mientras que para separar el PET del PVC se recomienda un método de rayos X que se revisara más adelante. Además de que el HDPE pigmentado puede ser clasificado mediante el color con sistemas más sencillos de video y computador.

El segundo sistema tiene la capacidad de reconocer inmediatamente de entre todos los termoplásticos que se estudiaron antes incluyendo el PC. Además en este procedimiento una cámara de color unido a una luz estroboscópica permite la identificación según el color por los diferentes espectros de cada pigmento.

Después de este punto, en ambos procedimientos, los elementos son marcados para posteriormente por acción de un sensor mediante ráfagas de aire los echan a nuevas cintas transportadoras para cada polímero. Mientras que si un elemento no es reconocido se lo retorna al inicio del procedimiento

Estos procedimientos son analizados con los métodos de la Media Transformada de Fourier para Espectroscopia Infrarroja (FTMIR) y la Transformada de Fourier para Espectroscopia Raman (FT Raman), siendo el segundo más eficiente que el primero.

Cabe señalar que conjuntamente con los métodos señalados, o por cuenta propia, existen sistemas que facilitan la espectroscopia infrarroja como es al caracterizar la cresta dominante del espectro de absorción para cada tipo de polímero con lecturas de la longitud de onda únicamente. O mediante la técnica de tres-resinas que utiliza cadenas artificiales neutrales para una rápida identificación, que son procesos combinados para aprender a identificar el polímero.

2.4.1.2 Rayos X

Otra opción para la clasificación de los plásticos es el empleo de rayos X, por medio de la transmisión y la reflexión. Siendo similar a la espectroscopia en los primeros pasos del procedimiento, este método se caracteriza por exponer el plástico no identificado a ondas, dentro del rango de los rayos X, fenómeno que expulsa uno o más electrones de las cajas de cada átomo, lo que permite a un átomo mas externo saltar de capa, lo que genera una energía de fluorescencia radioactiva, y es posible medir su reacción.

Este método es utilizado con mayor frecuencia al clasificar PVC, ya que sus átomos de cloro dan como resultado un único pico en el espectro a estudiar. Además no requiere que el plástico de desecho sea alineado en las cintas transportadoras tan rigurosamente puesto que tiene mayor capacidad de clasificación con una tasa de error de 1 a 100000, a mayor velocidad.

Compañías como ASOMA INSTRUMENTS con su producto VS-2, y la National Recovery Technologies Incorporated (NRT) con su Vinylcycle son algunos de los fabricantes de máquinas clasificadoras basadas en este sistema.

2.4.1.3 Identificación por laser

Como en los anteriores métodos, el plástico es expuesto a un elemento de identificación para luego estudiar su respuesta o su espectro utilizando la espectrometría Raman, debido a que aprovecha de mejor manera la potencia de la onda electromagnética laser, tomando en cuenta que dicha técnica lleva a las moléculas a un estado vibracional o rotacional de energía superior (característico para cada enlace y masa de las partículas), pero solo dispersa 1 fotón por cada 10^{11} incidentes, en este caso el elemento de identificación son resplandores del laser.

El laser puede ser de CO₂, y funciona usando la respuesta al impulso de calor, ya que por medio de un sistema termográfico infrarrojo propiedades como: coeficiente de absorción, conductividad térmica, coeficiente térmico y distribución de temperatura en la superficie puede ser grabado. Lo que da como resultado un rápido y versátil sistema de clasificación.

De las investigaciones realizadas a este método se pudieron sacar las siguientes conclusiones¹⁰:

1. Debido a la energía contenida en el laser, pequeños daños ocurren en la superficie del objeto
2. Elementos como el espesor, formas, acabado superficial, aditivos o pigmentos no varían la medición.
3. El método no responde bien a las áreas altamente concentradas, en especial por el carbono.
4. Se puede tomar mediciones desde 1/10 segundos

¹⁰ Automated Sorting of Plastics for Recycling, Edward A Bruno

2.4.1.4 Sistemas de marcación

Este método propone la marcación a los contenedores o a la resina propiamente con algún elemento que sea fácilmente detectable, el cual se pueda leer como un marcador oculto¹¹.

La opción primera es marcar los contenedores con una tinta invisible fácilmente detectable, método desarrollado por Continental Container Corporation, la cual permite clasificar a los polímeros según el tipo de resina, según el color, según los tipos de aditivos necesarios para la polimerización y según el contenido del recipiente. Este sistema es costoso, por lo menos en un inicio, pero es indispensable para clasificación a gran escala.

Otra alternativa para este método es mediante marcas moleculares, sistema desarrollado por la Eastman Chemical Company, para separar según el tipo de resina, por ejemplo el uso del 2-tionaftolato sódico (NaTN) y Ptiocresolato sódico (NaTC) como injerto en la cadena del PVC para ser detectados por espectroscopia UV. En el lado positivo de este sistema es el bajo incremento en el costo por la adición de la marca a la resina, y solo necesita la colaboración de las empresas recicladoras de plásticos y fabricantes de resinas, y no de todos los productores de envases como en el método anterior, lo que disminuye el máximo el grupo de trabajo.

La empresa productora de resinas Bayer A.G. ha estudiado sistemas con un tinte fluorescente, o una combinación de ellos, para cada grado de termoplástico, y que puede ser añadido en pequeñas cantidades (alrededor de 5 gramos por tonelada) a sus productos sin variar la apariencia o las propiedades del mismo, siendo altamente sensibles para su identificación por un dispositivo de diodo. Este sistema necesita la colaboración de las recicladoras y las empresas productoras al igual que los sistemas anteriores.

¹¹ U.S. EPA 1991

2.4.1.5 Luz polarizada

Otro de los métodos que podemos utilizar para clasificar los plásticos, es utilizando el principio de luz polarizada, basado en la estereoquímica.

Se puede concebir a un haz de luz como si estuviese compuesta por diminutas ondas que oscilan en todos los planos posibles en los 360° alrededor del eje direccional del haz. Estos planos están equitativamente repartidos sin que haya privilegios para alguno de ellos que contenga mayor cantidad de ondas luminosas.

Según este concepto, la luz polarizada se produce cuando un haz de luz es forzado a pasar por un polarizador, que es un cristal compuesto de multitud de átomos o grupos de átomos alineados en filas y capas regulares. Por consiguiente solo pueden pasar a través del polarizador las ondas luminosas que estén alineadas con el plano que les permita colocarse entre dos capas de átomos, ya que si oscilan en otro plano diferente chocaran contra los átomos y su energía se disipara en hacerlos vibrar.

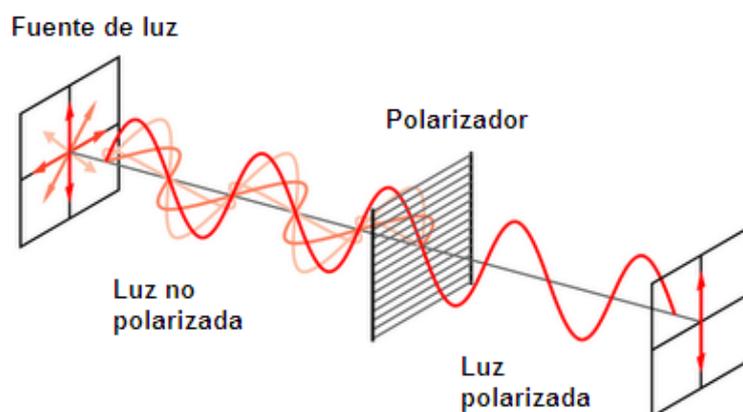


Figura 2.11 Representación polarizador de luz¹²

Importante es señalar que cuando la luz polarizada pasa a través de una sustancia que contiene moléculas con centros asimétricos o quirales, el plano de oscilación gira. La dirección y magnitud de ese giro ha permitido a los químicos deducir

¹² <http://img508.imageshack.us/i/680pxwiregridpolarizersas1.jpg/>

muchas cosas acerca de la estructura real de las moléculas, y sobre todo de las orgánicas. A estas sustancias se las denomina *ópticamente activas*, y pueden ser *dextrógiras* cuando el plano se desvía hacia la derecha, sentido de las agujas del reloj, utilizando los símbolos (+) ó *d* para su representación, o también pueden ser *levógiras* si se desvía hacia la izquierda, representándose mediante los símbolos (- ó *l*).

Tanto el polarizador como el analizador, que es un polarizador que puede ser rotado cierto ángulo, solo permiten el paso de la luz polarizada en un determinado plano. Cuando los dos componentes están paralelos la luz llegara al detector o al observador si el plano de la luz polarizada no se desvía al atravesar la muestra. Sin embargo, si esta sustancia es ópticamente activa se debe girar el analizador, hasta conseguir que la luz llegue al observador, siendo este ángulo el mismo que ha experimentado el plano de la luz polarizada al atravesar la sustancia.

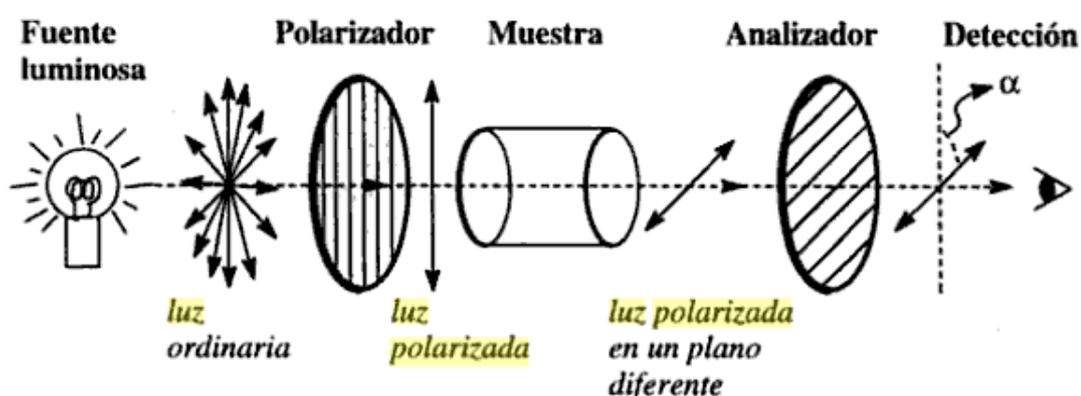


Figura 2.12 Representación de la caracterización de polímeros mediante polarizador de luz¹³

2.4.1.6 Prueba de ensayo a la llama

Se basa en la combustión de una muestra de polímero y observar el comportamiento que presenta al quemarse como el color de la llama, el olor y color de humo producido, entre otras. Una de las desventajas de este método es

¹³ Introducción a la química orgánica; Santiago V. Luis Lafuente; María Isabel Burguete Azcárate, Belén Altava Benito

que se torna complicado diferenciar al PE del PP, además de que se debería someter a la llama cada elemento, lo que no es rentable para el reciclaje a mediana y gran escala. Por lo que este método es válido solo si se tiene la certeza de que todo el grupo de plásticos es del mismo tipo, representando una clasificación manual desde la fuente, que justamente es el problema inicial; además que la llama altera las propiedades del material.

Sin embargo a continuación se presenta una tabla de las características que presenta la combustión de cada polímero.

Tabla 2.14 Prueba de identificación mediante combustión

POLIMERO	CARACTERISTICA DE LA LLAMA Y COMPORTAMIENTO	OLOR
PVC	Llama amarilla con vértice verde, auto extingible, produce hollín, se ablanda, se carboniza	Cloro
PEBD	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante, produce hollín, produce goteo	Cera
PEAD	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante, produce hollín, incoloro al fundirse, produce goteo	Cera
PP	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante y sin humo, produce goteo	Petróleo y Cera
PS	Llama amarilla, produce ruido al quemarse, produce hollín, produce goteo, fácilmente inflamable, se ablanda, se carboniza	Estireno (olor dulce)
PET	Llama amarilla, se contrae al quemarse	-

Fuente: Edición especial para proyectos de formación profesional en los Institutos Salesianos; Tecnología mecánica; Instituto Brasileiro del PVC

2.4.2 MICROCLASIFICACION

2.4.2.1 Método de hundimiento-flotación

Utiliza el simple principio de separación de materiales mediante sus diferentes densidades. El método se efectúa colocando los materiales en uno o diferentes tanques con algún líquido con densidad conocida. Para que este método tenga éxito, los materiales deben tener densidades bien diferentes, provocando que los elementos livianos con respecto al líquido floten y los más pesados se hundan. El ejemplo más claro en que este método no es efectivo es al separar el PVC de

PET, pues tienen densidades similares. Para solucionar este problema en ciertos casos se pueden utilizar agentes químicos como el hidróxido de sodio, para incrementar el volumen de uno de los polímeros mediante un tratamiento previo.

Tabla 2.15 Rango de densidades de los termoplásticos

RANGO DE DENSIDADES DE LOS TERMOPLASTICOS	
LDPE	910 – 930 Kg/m ³
HDPE	950 – 960 Kg/m ³
PVC	1300 – 1500 Kg/m ³
PP	900 – 910 Kg/m ³
PET	1370 Kg/m ³
PS	1040 – 1070 Kg/m ³

Fuente: www.matbase.com; www.polymerweb.com

Para que este método de separación sea más eficiente incluso entre plásticos con similar densidad, el líquido de separación es sometido a altas presiones llevándolo cerca de su punto crítico, donde se puede variar la densidad del fluido levemente con pequeñas variaciones de la presión. Para este sistema se debe ajustar la densidad del líquido en un punto intermedio entre la densidad de los dos polímeros a clasificar, lo que produce una separación rápida debido a la baja densidad del líquido, incluso con pequeñas diferencias entre los plásticos y el polímero.

Este sistema utiliza primero agua para separar las poliolefinas (HDPE, LDPE, PP) de las no-olefinas (PS, PVC y del PET). Luego el HDPE es separado utilizando un medio compuesto de CO₂ cercano al punto crítico, y posteriormente el LDPE se separa del PP utilizando el mismo compuesto. Mientras que en el otro lado el PS es separado utilizando una solución de agua con sal, y el PVC es separado del PET utilizando hexafluoruro de azufre (SF₆) cercano al punto crítico. Además esta técnica puede separar el HDPE según sus colores por la ligera diferencia de densidad.

De entre las ventajas que podemos describir de este método está en que la clasificación es un proceso continuo, aunque es lento puesto que toma cierto

tiempo que las partículas u objetos se precipiten al fondo. Además requiere de un paso para separar cada material, puesto que es un sistema binario

Uno de los sistemas innovadores basados en este método de flotación y hundimiento, como son los clasificadores por lecho fluidizado, el cual tiene la ventaja de poder separar varios plásticos simultáneamente sin modificar el agua.

Pero también existen otros sistemas con este principio, como es el uso del hidrociclo en un acelerador centrífugo, el cual es mucho más rápido. De igual manera que la separación en seco mediante flujos de aire, recomendado para películas y bolsas, es un sistema probado que requiere similar tamaño de las partículas.

Todo esto lo hace un método económicamente prometedor con resultados del 95% de efectividad, siendo ampliamente el método más usado.

2.4.2.2 Método de flotación por espuma

Similar al método anterior, puesto que requiere cierto tiempo para la precipitación de los plásticos y es un sistema binario, en el método de flotación por espuma, los elementos a clasificar son primeramente tratados con un agente tensoactivo para favorecer la humidificación de la superficie del plástico y después suspendidos en agua, puesto que con dicho agente, los plásticos que normalmente se hundirían en el agua se suspenden en una mezcla. Entonces aire es inyectado al sistema y algunas burbujas de se adhieren a algunas partículas dependiendo del polímero, mientras más mojado este la superficie del plástico menor es la adhesión de la burbujas de aire y viceversa, causando su flotación hacia la superficie, mientras que las partículas no afectadas por la burbujas de aire se hunden; y se logra separar los materiales.

Este fenómeno ocurre puesto que la mayoría de los plásticos utilizados hoy en día tienen superficies hidrófobas, que quiere decir que no se humedecen

completamente, por lo que tienen burbujas de aire entre sus moléculas, lo que las eleva hasta la superficie del líquido.

Entre las ventajas de este método podemos decir que no requiere de gran tecnificación, los químicos necesarios no son costosos y no producen ningún daño al ambiente y además puede separar el PVC de PET.

2.4.2.3 Disolución selectiva y devolitization por destello

Este es un método que todavía se encuentra en la fase de investigación. El método clasifica los plásticos mixturados en polímeros puros reutilizables sin procesos de clasificación mecánica previos.

En la investigación realizada en el Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), xileno es usado para disolver individualmente al PVC, PS, LDPE, HDPE y PP. Cuando el xileno es colocado en las partículas de plástico mixturado a temperatura ambiente, se disuelve el PS sin tocar siquiera a los demás polímeros. La solución de xileno y PS es luego drenada a otro tanque donde la solución se calienta hasta la temperatura de ebullición del xileno. La solución es enviada entonces a otra cámara donde la presión es disminuida con velocidad causando la vaporización del xileno. Esto deja detrás del PS puro en destellos. El xileno es recuperado y vuelto a colocar en el plástico mixturado, repitiéndose así el proceso a diferentes temperaturas, dependiendo de cada plástico en su disolución en xileno. El PET necesita un solvente diferente, que por varios criterios se recomienda sea el n-metil 1-2-pirrolidona (NMP), que es un solvente orgánico muy utilizado en la producción de lacas, quita pinturas y elementos de limpieza eléctrica.

Otros estudios hechos por la Universidad de Cornell sostienen que un solo sistema de solvente no es suficiente. Algunos de los problemas que este estudio arrojó sobre el sistema anterior del RPI son: las altas presiones envueltas en el proceso que requieren mucha energía y costosos equipos, altas temperaturas que aumentan el riesgo de degradación térmica de los polímeros, y la reducida pureza

del polímero debido a un solo sistema de solventes. La reducción de la pureza es por la parcial disolución de polímeros a temperaturas menores que otras partículas insolubles añadidas a la mezcla para ser disueltas a mayores.

Por último, el estudio hecho por la Universidad de Cornell sugiere combinar los métodos de flotación (económicos pero poco efectivos), con los de disolución selectiva (costosos pero efectivos), utilizando diferentes solventes para cada polímero.

2.4.2.4 Fricción electrostática

Los plásticos también pueden ser clasificados usando el método de la fricción electrostática puesto que cada polímero se energiza con diferente carga y esta puede ser medida utilizando un medidor de carga. Este método puede ser de macroclasificación o microclasificación, requiere que los plásticos estén secos y es una buena alternativa para polímeros con similares densidades. El problema con este método radica en que si los elementos a clasificar son cargados mediante frotación, existen materiales que se cargan de diferentes maneras dependiendo del material que se uso para cargarlo, lo que representa que el mecanismo necesita ser programado de acuerdo a los elementos del sistema y aun así debe pasar por diferentes estaciones con diferentes materiales para estar seguro de su composición química, y esto no garantiza su eficacia total.

2.4.2.5 Temperatura de reblandecimiento

También se puede usar la temperatura de reblandecimiento de los plásticos para su clasificación, puesto que al aplicarlos calor justo por debajo de la temperatura de fusión estos se vuelven pegajosos y pueden ser adheridos a un tambor, un cinta, o una hoja cortante para separarlos del resto. De esta manera se clasifican primero los polímeros con bajas temperaturas de reblandecimiento, aunque vale señalar que algunos polímeros también tienen similares valores en este campo, por lo que requiere otro método complementario.

2.4.2.6 Análisis térmico: Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La definición de análisis térmico abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de un sistema (sustancia o un material) en función de la temperatura mientras se le somete a un programa de temperatura controlado. Se pueden distinguir más de una docena de métodos térmicos que difieren en las propiedades medidas y en los programas de temperatura. Estos métodos encuentran una amplia aplicación tanto en el control de calidad como en investigación de productos farmacéuticos, arcillas y minerales, metales y aleaciones, polímeros y plásticos.

Cuando un material es calentado o enfriado, su estructura y su composición química sufren cambios: fusión, solidificación, cristalización, oxidación, descomposición, transición, expansión, sinterización, etc.

Estas transformaciones se pueden medir estudiar y analizar midiendo la variación de distintas propiedades de la materia en función de la temperatura. De los cuales entre los más importantes tenemos:

- Cambios de peso: Termogravimetría (TG)
- Cambios de calor: Análisis térmico diferencial (ATD)
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)
- Propiedades mecánicas: Análisis Termomecánico (TMA)

De estos procesos el que estudiaremos a fondo es la Calorimetría diferencial de barrido (DSC), caracterizado por permitir el estudio de los procesos en los que existe una variación entálpica como puede ser la determinación de calores específicos, puntos de ebullición y cristalización, pureza de compuestos cristalinos, entalpías de reacción y determinación de otras transiciones de primer y segundo orden.

El DSC puede trabajar en un intervalo de temperaturas que va desde -200°C aproximadamente (temperatura del nitrógeno líquido), hasta unos 600°C. Por esta

razón esta técnica se emplea para caracterizar materiales que sufren transiciones térmicas en dicho intervalo, y la familia de materiales que precisamente presenta todas sus transiciones térmicas en este intervalo son los polímeros. Por esta razón, el DSC se emplea fundamentalmente para la caracterización de estos materiales.

En el campo de polímeros pueden determinarse transiciones térmicas como la temperatura de transición vítrea T_g , temperatura de fusión T_m ; se pueden hacer estudios de compatibilidad de polímeros, reacciones de polimerización y procesos de curado.

Cualquier reacción polimérica acompañada por un cambio entálpico puede ser seguida por este método, que es ampliamente utilizado para el estudio de polimerizaciones, especialmente en sistemas basados en resinas epoxi y monómeros acrílicos. La reacción de formación de polímeros tiene lugar con desprendimiento de calor de polimerización, y la velocidad con que se desprende este calor está relacionada con el desarrollo de la reacción, lo que permite el estudio de la cinética de polimerización.

Este método tiene como finalidad registrar la diferencia en el cambio de entalpia que tiene lugar entre una muestra y un material inerte de referencia (sustancia que no sufre ninguna transición o transformación en el intervalo de temperaturas en el que se mida) en función de la temperatura o del tiempo, cuando ambos están sometidos a un programa controlado de temperaturas. La muestra y la referencia se alojan en dos pocillos idénticos que se calientan mediante resistencias independientes. Esto hace posible emplear el principio de "balance nulo" de temperatura. Cuando en la muestra se produce una transición térmica (un cambio físico o químico que da lugar a una liberación o absorción de calor), se adiciona energía térmica bien sea a la muestra o a la referencia, para mantener ambas a la misma temperatura. Debido a que la energía térmica es exactamente equivalente

en magnitud a la energía absorbida o liberada en la transición, el balance de energía proporciona una medición calorimétrica directa de la energía de transición.

Como parte de la instrumentación necesaria para este método se considera que un calorímetro diferencial de barrido consta de un horno calorimétrico, un sistema de gas de purga y un procesador para el control del instrumento y la adquisición de datos.

Además existen dos tipos de técnicas para obtener datos en este método: i) DSC de potencia compensada y ii) DSC de flujo de calor. En la primera, la muestra y la referencia se calientan mediante calentadores separados aunque sus temperaturas se mantienen iguales mientras varían linealmente.

En la segunda, se mide la diferencia de cantidad de calor de la muestra y de la referencia cuando la temperatura de la muestra varía linealmente. De estas técnicas, la primera es la más utilizada.

El DSC mide el flujo de calor en la muestra a estudiar y en la referencia (que suele ser indio o zinc) de forma independiente. En la figura siguiente se muestra un esquema de un equipo para DSC, donde ambas células, con capacidad de hasta 30 mg¹⁴, contienen la muestra y la referencia, están equipadas con un sensor para medir su temperatura, y una resistencia de calentamiento independiente para cada una de ellas. Estas resistencias mantienen ambas células a una temperatura programada T_p . Las temperaturas instantáneas de cada célula (T_m y T_R) se miden y comparan continuamente con el valor programado T_p para suministrar calor en cada célula independientemente en caso de ser necesario. Entonces:

$$\begin{aligned} E_m &= W_m (T_m - T_p) \\ E_R &= W_R (T_R - T_p) \end{aligned} \quad 2.2$$

¹⁴ ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_MeTODOS_DE_ANALISIS_TERMICO.pdf

Donde E_m y E_R son las energías eléctricas suministradas por las resistencias, y W_m y W_R son constantes del sistema, que dependen de las características de cada material, como la masa y su capacidad calorífica. La diferencia de energía, $\Delta E = E_m - E_R$, requerida para mantener las células a temperatura programada, es la cantidad que se representa en función de la temperatura (T_p , T_R ó T_m) o en función del tiempo a temperatura constante. A estas representaciones se les denomina termogramas.

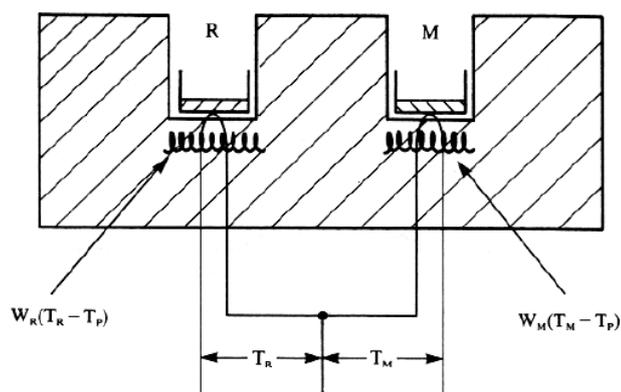


Figura 2.13 Representación calorímetro diferencial de barrido¹⁵

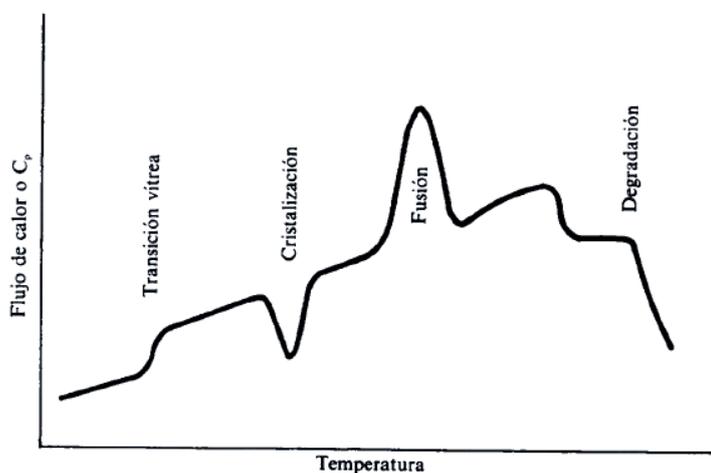


Figura 2.14 Termograma de un polímero semicristalino típico¹⁵

¹⁵ ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_MeTODOS_DE_ANALISIS_TERMICO.pdf

En el DSC se mide las temperaturas propias de las células metálicas, por lo que es necesario un calibrado previo, que es diferente para cada velocidad de transferencia de calor.

De entre las variables que deben ser siempre tomadas en cuenta son:

- i) De tipo instrumental
 - Velocidad de transferencia de calor
 - Geometría de la células
 - Tipo de sensor de temperatura
 - Tipo de registro del termograma

- ii) De la muestra
 - Tamaño de la muestra
 - Grado de división de la muestra
 - Empaquetamiento
 - Control atmosfera ambiente
 - Tratamiento previo

- iii) Material de referencia

Existen dos tipos de ensayos para este método: i) Dinámico e ii) Isotermo; en el primero la muestra se somete a procesos de calentamiento o enfriamiento constante y se obtiene la variación de flujo de calor en función de la temperatura. Mientras que en el segundo, se calienta la muestra hasta una temperatura que se mantiene constante durante el resto del ensayo, y se obtiene la variación del flujo de calor en función del tiempo.

2.4.2.7 Otros

Aunque no es parte de este estudio, existe un método para garantizar la eficacia en el reciclaje del plástico sin clasificarlo previamente, y consiste en pulverizar a todos los polímeros formando un polvo de partículas ultra finas, donde los polímeros tienen una estructura molecular más estable.

Este método mecánico - químico ayuda a solucionar el problema de la incompatibilidad entre los diferentes tipos de plásticos, dando como resultado una mezcla que puede ser utilizada directamente como alternativa para crear plásticos de calidad, aunque sus propiedades varían mucho pues depende de la clase y cantidad de plásticos que se reciclaron un día específico. De este método se produce la madera plástica.

CAPITULO 3

ANALISIS Y SELECCIÓN DE METODOS PARA SER UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA

3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS METODOS APLICABLES A LA INDUSTRIA ECUATORIANA.

3.1.1 CRITERIO SOBRE EFICACIA

Por definición y para nuestro estudio, un método es eficaz cuando cumple de mejor manera con el objetivo de identificar las diferentes clases de polímeros, sin tomar en cuenta el entorno o las restricciones a nivel de industria que pueda tener dicho método.

Aquí se incluyen los siguientes parámetros de selección:

- Capacidad de clasificación: Este parámetro examina si el método planteado puede reconocer todos los tipos de plástico, o que tan confiable puede llegar a ser. Mientras pueda reconocer mejor, y pueda aplicarse a mas plásticos tendrá un mayor valor
- Afectación al material: El material en lo posible no debe ser afectado durante el proceso de clasificación puesto que se pueden ver afectadas las propiedades características del polímero y estropear su reciclaje. Mientras menos afecte el método al material, tendrá un valor más alto.

3.1.2 CRITERIO SOBRE EFICIENCIA

En vista de que este es un estudio previo a la implementación de una industria de mediana capacidad, la eficiencia toma en cuenta parámetros a nivel de industria que la eficacia olvida. En este criterio se encuentran los siguientes parámetros:

- Pre tratamiento del material: De acuerdo a si es macro o microclasificación se necesitara cortar, triturar o hasta pulverizar al material para obtener resultados confiables. En este caso solo habrá valores de 10 o 0 por ser un parámetro binario.

- Velocidad de separación: La velocidad de separación es fundamental para todo proceso productivo. Aquí solo se tomara en cuenta la velocidad del proceso y no sus demás implicaciones dentro de la producción, como el pretratamiento. A mayor velocidad se asignara mayor puntaje.
- Optimización en el almacenaje: El almacenamiento del material ya clasificado es un elemento importante a tomar en cuenta, puesto que los elementos clasificados por macroclasificación tienen por lo general cavidades huecas, ocupando espacio innecesario. Este parámetro está ligado con el pretratamiento del material y a menor espacio se asignara un mayor valor
- Automatización en la industria: El método es más eficiente para la industria cuando se puede manejar de forma automática, con la finalidad de reconocer grandes cantidades de polímero, con menor supervisión y en menor tiempo.

3.1.3 CRITERIOS TECNICO/OPERABILIDAD/RIESGO

El criterio técnico está definido por la complejidad que represente la implementación del método tanto en su implementación como en su operación.

- Facilidad de implementación: Cada método exige cierto equipamiento industrial para su correcto funcionamiento, lo cual puede llegar a ser un impedimento. Mientras más fácil, mayor valor.
- Facilidad de manejo: Aquí se evalúa si el método como tal requiere una extrema capacitación del operario, o si se necesita calibración permanente al incluir muchas variables. Mientras más fácil, mayor valor
- Facilidad de mantenimiento: Hay métodos que por su tecnificación necesitan más y un mejor mantenimiento predictivo y correctivo. Mientras más tecnificación tenga es natural que requerirá de un mantenimiento más especializado, por lo que el valor más alto será cuando el mantenimiento es más simple.
- Riesgo Humano: El riesgo humano en la aplicación de cada método tiene que ver con las tecnologías que estas utilizan o sobre los residuos que deja

el proceso. Por principio, nada es más importante que la seguridad del operario, pero según los riesgos existentes a menor riesgo mayor valor relativo.

- Riesgo Ambiental: El riesgo ambiental es de suma importancia en la elección del método más adecuado, puesto que el principal fundamento de este trabajo es ayudar al ecosistema en el reciclaje de plásticos, por lo cual no podemos contaminar más que lo que descontaminamos. Mientras menos contaminación represente el proceso para el ecosistema será más alto en su valor

3.1.4 CRITERIO ECONOMICO-FINANCIERO

Para determinar si un proyecto es viable, y en nuestro caso, si un método puede ser ejecutado, se tiene que enmarcar necesariamente dentro de un estudio económico financiero que lleve a la empresa a la recuperación del capital de la manera más rápida posible, por lo que la inversión debe ser la menor posible con la eficacia y eficiencia más altas. Desde este punto de vista se seleccionara un método acorde con las necesidades de una empresa de tamaño medio que está iniciando. Este criterio por lo general está relacionado con el anterior, y se asignara un valor relativo mayor al proceso que implique menor costo.

- Costos de implementación
- Costos de operación
- Costos de mantenimiento

3.1.5 CRITERIO DE ACCECIBILIDAD EN EL ECUADOR

Todos los criterios anteriores están relacionados entre sí, y a su vez todos dependen de facilidad con la que se puede montar el sistema seleccionado en el Ecuador. Ya habiendo avanzado en los demás criterios, estos se pueden ver afectados o modificados al encontrar que no existe oferta de la tecnología necesaria o se incrementan los costos de forma excesiva.

3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

3.2.1 ESCALA DE VALORACION

Para la selección de la mejor alternativa, se utilizara el método Combinex, el cual realiza la ponderación de los parámetros en una primera matriz, para luego evaluarlas en cada método.

A la primera se le denomina Matriz para el Análisis del Valor, y busca determinar el factor de peso de cada uno de los parámetros, para ser ordenados de acuerdo a la importancia que tienen para la selección de la alternativa, para lo cual comparamos entre ellos para obtener el factor de peso, teniendo en cuenta las siguientes reglas:

- Si el factor de la fila es mayor que el factor de la columna, se asigna el valor de 1 en la cuadrícula donde e intersecan los factores.
- Si el factor de la fila es igual que el factor de la columna, se asigna el valor de 1/2 en la cuadrícula donde e intersecan los factores.
- Si el factor de la fila es menor que el factor de la columna, se asigna el valor de 0 en la cuadrícula donde e intersecan los factores

Una vez asignados los valores se suman de manera horizontal, para obtener los puntos de cada parámetro, se realiza la suma total de los sumatoria de los puntos de manera vertical, y el valor obtenido debe ser múltiplo de 10, o en caso contrario se recomienda modificar los valores de los puntos hasta cumplir esta condición.

El Factor Peso se obtiene al dividir el valor del puntaje de cada parámetro para el valor total.

Para asignar los valores de esta matriz se tomaran en cuenta los siguientes criterios en orden de importancia:

1. **El riesgo humano** es el primer parámetro, pues nada es más importante que la vida de las personas, por lo que este siempre tendrá el valor de 1 ante los demás.
2. **La capacidad de clasificación** del método es de vital importancia, puesto que de este depende la calidad del producto y la competitividad de la empresa, estando solo a la par de los siguientes parámetros por estar correlacionados:
 - El grado de afectación al material, porque el material degradado no puede ser reciclado al 100%, por lo que puede resultar un producto de mala calidad.
 - La capacidad de automatización en la industria, porque un método que no puede ser automatizado, no tendrá la misma precisión y velocidad de clasificación de uno que si, afectando a la competitividad.
 - El riesgo ambiental, puesto que el fin de la industria es ayudar al medio ambiente, no se puede contaminar más de lo que se recicla.
3. **La automatización en la industria** tendrá mayor valor que los demás parámetros por las razones del punto anterior, estando solo a la par de la capacidad de clasificación, afectación al material y riesgo ambiental.
4. **La afectación al material** tendrá más importancia que la 9 de 14 parámetros posibles, por la razón descrita en el punto 2, estando a la par de la capacidad de clasificación, la capacidad de automatización, la automatización en la industria y el riesgo ambiental, sumándose con la misma importancia la accesibilidad en el Ecuador, puesto que si un método no afecta al material, pero no existe accesibilidad en el país se optará por uno que afecte mínimamente al material (laser) pero que exista en el Ecuador.

5. **La velocidad de separación**, dentro de la eficiencia del método, es sumamente importante, porque de esto depende, casi exclusivamente la capacidad de procesamiento de la empresa, teniendo el valor de 1 en relación con los subsiguientes métodos, de 0 con los métodos anteriores, y a la par únicamente de la accesibilidad en el Ecuador, pues no tiene lógica elegir el método más veloz si no se puede acceder en el país, pero tampoco por eso se escogerá el más lento, por lo que parámetros equivalentes.
6. **El riesgo ambiental** es desde este punto de gran importancia, pues el proyecto busca dar herramientas que faciliten la reutilización de elementos plásticos para ayudar al medio ambiente, por lo que sería una incoherencia que dichos métodos generen gran cantidad de contaminación. Y si bien no es un factor muy importante para la clasificación en sí, se debe tomar muy en cuenta para compararlo con los subsiguientes parámetros.
7. Los siguiente parámetros que tienen gran importancia para elegir el método son los **costos de implementación, costos de operación, y costos de mantenimiento**, en ese orden, puesto que estos son el limitante de toda empresa para empezar un proyecto o para mantenerlo productivo. Así que después de garantizar la calidad de producto y su capacidad de producción se evalúa su costo.
- De este punto el costo de implementación tiene igual importancia que la facilidad de implementación, pues generalmente están ligados. Igual importancia que el riesgo ambiental, pues no por ser el método más económico se atentara contra la naturaleza. E igual importancia que la accesibilidad en el Ecuador puesto que se debe buscar un equilibrio y siempre los equipos importados especialmente son más costosos.
 - Los costos de operación y mantenimiento son de solo equiparables al riesgo ambiental, y de la accesibilidad en el país, por similares razones que los puntos anteriores.

8. A sabiendas que si se desea implementar nuevas tecnologías para cualquier industria, **la accesibilidad en el país** será mínima o nula, es importante tomarlo en cuenta para analizar los demás criterios, sin ser este demasiado desequilibrante puesto que la visión y misión de la industria, determinados por los criterios de eficacia y eficiencia, deben superar este inconveniente. Por lo que se buscara un equilibrio en la mayoría de los parámetros a analizar pues de eso también dependen otros parámetros
9. Después de que los anteriores parámetros hayan sido considerados, es importante tomar en cuenta **la facilidad de manejo** del sistema a implementarse, y aunque por lo general hay más facilidad mientras más automatizados estén los procesos, en caso de no ser así siempre es más fácil y rentable la capacitación. Así este parámetro solo se equipara con el riesgo ambiental y la accesibilidad en el Ecuador.
10. La **facilidad de mantenimiento** depende de la complejidad y tecnificación del sistema, y está completamente ligado a sus costos de mantenimiento, pero siempre será más fácil y rentable la capacitación antes que perjudicar los objetivos de calidad y capacidad de la industria. Se iguala únicamente a la accesibilidad en el Ecuador
11. Aunque siempre ligada a los costos de implementación y a la accesibilidad, la **facilidad de implementación** es un parámetro que casi carece de importancia, porque toda innovación llevara consigo desafíos que no fueron experimentados previamente, pero primará la visión de la industria, lo cual es justamente el caso del proyecto.
12. La **necesidad o no del pretratamiento del material y la optimización al momento de almacenar** son los parámetros menos importantes a tomar en cuenta, ya que si el sistema es eficaz, eficiente, y económico, esta sobre estos criterios, y aunque pueden estar en relación con la velocidad de clasificación y los costos, no son significativos para desarrollar el método seleccionado.

TABLA 3.1 MATRIZ PARA EL ANALISIS DEL VALOR

No.	PARAMETROS DE EVALUACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Punto pi	Punto aprox pi	Factor de peso WF
1	Capacidad de clasificacion	N/A	0,5	1	1	0,5	1	1	1	1	0	0,5	1	1	1	1	11,5	12	0,11
2	Afectacion al material	0,5	N/A	1	1	0,5	1	1	1	1	0	0,5	1	1	1	0,5	11	11	0,10
3	Requiere pretratamiento	0	0	N/A	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0,02
4	Velocidad de separacion	0	0	1	N/A	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0,5	8,5	9	0,08
5	Automatizacion en la industria	0,5	0,5	1	1	N/A	1	1	1	1	0	0,5	1	1	1	1	11,5	12	0,11
6	Optimizacion en el almacenaje	0	0	0	0	0	N/A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
7	Facilidad de implementacion	0	0	1	0	0	1	N/A	0	0	0	0,5	0,5	0	0	0,5	3,5	4	0,04
8	Facilidad de manejo	0	0	1	0	0	1	1	N/A	1	0	0,5	0	0	0	0,5	5	5	0,05
9	Facilidad mantenimiento	0	0	1	0	0	1	1	0	N/A	0	0	0	0	0	0,5	3,5	4	0,04
10	Riesgo humano	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N/A	1	1	1	1	1	14	14	0,13
11	Riesgo ambiental	0,5	0,5	1	1	0,5	1	0,5	0,5	1	0	N/A	0,5	0,5	0,5	0,5	8,5	9	0,08
12	Costos de implementacion	0	0	1	0	0	1	0,5	1	1	0	0,5	N/A	1	1	0,5	7,5	8	0,07
13	Costos de operación	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0,5	0	N/A	1	0,5	7	7	0,06
14	Costos de mantenimiento	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0,5	0	0	N/A	0,5	6	6	0,05
15	Accesibilidad en el Ecuador	0	0,5	1	0,5	0	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	N/A	6,5	7	0,06
																	105	110	1,00

3.2.2 TABLA DE VALORES DE ALTERNATIVAS-MATRIZ DE DECISION

Como se puede ver en la matriz para el análisis de valor, los parámetros de Optimización en el almacenaje, y Requerimiento de pre tratamiento son nulos o despreciables en comparación de los otros parámetros, motivo por el cual se eliminarán de la matriz de decisión.

En la matriz de decisión se ingresan los valores obtenidos en la matriz de análisis de valor (Factor de peso WF), y de acuerdo a las características que tenga cada alternativa se le asigna el valor relativo (RV) a cada parámetro, de acuerdo a las características de cada método, siendo siempre analizados en una escala del 0 al 10.

1. Capacidad de clasificación: En este criterio la escala será dividida en seis valores (0, 2, 4, 6, 8, 10), entonces, si el método es capaz de analizar todos los elementos que nos interesan, sin importar sus compuestos adicionales o agentes externos se colocará el mayor valor de 10, y se irá reduciendo al siguiente valor por cada condición que no permita su identificación

- ***Espectroscopia infrarroja:*** Se le asignará el valor de 8 porque no puede reconocer elementos negros.
- ***Rayos X:*** Valor asignado 10
- ***Identificación laser:*** Se le asignará el valor de 8 porque no responde bien a las áreas altamente concentradas de carbono.
- ***Sistemas de marcación:*** Valor asignado 10
- ***Hundimiento Flotación:*** Se le asignará el valor de 6 pues no permite identificar el PET del PVC, y además los plastificantes u otros agentes pueden alterar las densidades.
- ***Flotación por espuma:*** Se asignará el valor de 8 porque a pesar de que se pueden identificar todos los elementos, la separación nunca es del 100%

- **Disolución selectiva y devolitización por destello:** A este método se le asignará el valor de 8 porque la técnica no llega a una separación del 100% del material
- **Fricción electrostática:** Se asignará el valor de 2 porque este método solo es aplicable entre el PET y el PVC.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignará el valor de 6 pues algunos polímeros tienen la misma temperatura, y no es 100% seguro.
- **Luz polarizada:** A este método se le asignará un valor de 4 pues solo es aplicable a elementos translúcidos, y a elementos quirales, lo cual lo hace poco eficaz.
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignará el valor de 8 pues es relativo al operador.
- **Análisis térmico:** Tendrá el valor de 8 porque no es posible identificar el PVC con este método.

2. Afectación al material: En este punto la escala se dividirá en únicamente 3 valores (0.5, 10), asignando 0 al método que afecte completamente al material, 5 al método que afecte medianamente al material, y 10 al método que no afecte en absoluto al elemento.

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignará el valor de 10 porque no afecta al material.
- **Rayos X:** Valor asignado 10
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 5 porque afecta mínimamente al material.
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado 5 porque los marcadores pueden afectar a las propiedades del elemento.
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignará el valor de 10 pues no afecta al material.
- **Flotación por espuma:** Se asignará el valor de 10

- **Disolución selectiva y devolitización por destello:** A este método se le asignará el valor de 5 porque si los solventes no son extraídos en su totalidad pueden llegar a afectar a los materiales.
- **Fricción electrostática:** Se asignará el valor de 10.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignará el valor de 5 porque elementos como el PVC son muy inestables a altas temperaturas.
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 10
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignará el valor de 0 pues el material es totalmente afectado al combustiones
- **Análisis térmico:** Tendrá el valor de 5 porque el PVC se degrada fácilmente a altas temperaturas

3. Velocidad de separación: En el análisis de este parámetro, se dividirá la escala en 5 valores (0, 2.5, 5, 7.5, 10), siendo los métodos binarios de varios pasos los de menor valor, los binarios de una sola separación tendrán el valor intermedio pues a pesar de ser rápidos deben tener un análisis previo, y los de mayor valor los que se pueden identificar en una cinta transportadora. Además de tomar en cuenta la naturaleza misma del método

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignará el valor de 10
- **Rayos X:** Valor asignado de 10
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 10
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado 10.
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignará el valor de 2.5
- **Flotación por espuma:** Se asignará el valor de 5
- **Disolución selectiva y devolitización por destello:** Se le asignará el valor de 5 pues la disolución del polímero requiere tiempo además de la eliminación de los solventes
- **Fricción electrostática:** Se asignará el valor de 5.

- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignara el valor de 5 porque básicamente es un método binario con varias temperaturas.
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 5, pues requiere una separación previa
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignara el valor de 5 porque depende la de velocidad del operador
- **Análisis térmico:** Tendrá un valor de 7.5 porque es un método rápido pero requiere de mucha precisión en las temperaturas.

4. Automatización en la industria: En este parámetro, por ser las únicas opciones “sí” o “no”, obtendrá valores de 10 si es automatizable o 0 si no lo es, mientras que 5 si podría llegar a serlo, entonces:

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignara el valor de 10
- **Rayos X:** Valor asignado de 10
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 10
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado 5.
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignara el valor de 10
- **Flotación por espuma:** Se asignara el valor de 10
- **Disolución selectiva y devolitizacion por destello:** Se le asignara el valor de 10
- **Fricción electrostática:** Se asignara el valor de 10.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignara el valor de 10
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 5.
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignara el valor de 0
- **Análisis térmico:** Tendrá un valor de 0

5. Facilidad de implementación: En este criterio la escala del 0 al 10 será dividida en 5 valores, 0 para aquellos que no pueden implementarse, 2.5 para los más complicados, 5 para los medianamente complicados, 7.5 para los medianamente fáciles de implementar y 10 para los realmente sencillos. Tomando en cuenta aspectos que mientras más técnicos serán más

difíciles, mientras más equipos habrá mayor dificultad y lo mismo mientras mayor sea su tamaño.

- ***Espectroscopia infrarroja:*** Se le asignara el valor de 7.5 porque a pesar de que sus equipos son de alta tecnología su implementación es básica.
- ***Rayos X:*** Valor asignado de 5, pues necesitan mayor precaución por tratarse de radioactividad
- ***Identificación laser:*** Se le asignará el valor de 5 porque la utilización del laser tiene que ser de alta potencia
- ***Sistemas de marcación:*** Valor asignado de 0 se debe a que es un sistema que necesita del apoyo mundial y de nuevas regulaciones.
- ***Hundimiento Flotación:*** Se le asignara el valor de 7.5, pues a pesar de que se necesita de gran espacio sus equipos y principio es conocido ampliamente.
- ***Flotación por espuma:*** Se asignara el valor de 7.5, al igual que el método anterior
- ***Disolución selectiva y devolitizacion por destello:*** Se le asignara el valor de 5, esto debido a que se necesita varias cámaras para funcionar, disolución, vaporización, extracción, todas con altas presiones que afectan a su facilidad.
- ***Fricción electrostática:*** Se asignara el valor de 7.5, porque el único inconveniente de dificultad es lograr el campo magnético necesario.
- ***Temperatura de reblandecimiento:*** Se le asignara el valor de 7.5
- ***Luz polarizada:*** Se asigna el valor de 10, pues sus equipos son simples y de fácil instalación.
- ***Prueba de ensayo a la llama:*** Se le asignara el valor de 10, pues se puede lograr con cualquier llama
- ***Análisis térmico:*** Tendrá un valor de 7.5 porque es un equipo que se puede construir con elementos ya utilizados previamente.

6. Facilidad de manejo: La facilidad de manejo tiene que ver en gran medida con el nivel de automatización en la industria, por lo que en este punto la escala tendrá los valores de 0, 2.5, 5, 7.5, 10. Representando 0 el nivel más alto de dificultad y 10 el nivel de mayor facilidad.

- ***Espectroscopia infrarroja:*** Se le asignara el valor de 10
- ***Rayos X:*** Valor asignado de 7.5, pues necesitan mayor precaución por tratarse de radioactividad.
- ***Identificación laser:*** Se le asignará el valor de 10.
- ***Sistemas de marcación:*** Tendrá el valor de 10, porque su caracterización proviene desde su fabricación.
- ***Hundimiento Flotación:*** Se le asignara el valor de 7.5, pues se necesita un control constante de las densidades y entornos de operación.
- ***Flotación por espuma:*** Se asignara el valor de 5, ya que las cantidades de químicos deben ser exactas para obtener los resultados deseados
- ***Disolución selectiva y devolitizacion por destello:*** Se le asignara el valor de 5, esto debido a las diferentes cámaras que requieren gran presión que debe ser monitoreada constantemente.
- ***Fricción electrostática:*** Se asignara el valor de 10, pues no requiere de mayor supervisión.
- ***Temperatura de reblandecimiento:*** Se le asignara el valor de 7.5, porque se debe estar seguro de que en realidad todos los elementos deseados se empezaron a fundir.
- ***Luz polarizada:*** Se asigna el valor de 7.5, pues requiere total atención del operador.
- ***Prueba de ensayo a la llama:*** Se le asignara el valor de 7.5, por igual razón que el método anterior.
- ***Análisis térmico:*** Tendrá un valor de 7.5 porque es un equipo que a pesar de estar automatizado, debe controlarse regularmente las temperaturas.

7. Facilidad de mantenimiento: Este numeral tendrá la división de la escala al igual que la anterior, y se relaciona con los dos anteriores en gran medida, pues analiza la complejidad de los equipos a utilizar, su principio y sus dimensiones en las instalaciones, así como su periodicidad.

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignara el valor de 7.5, centrándose en la configuración de los equipos electrónicos.
- **Rayos X:** Valor asignado de 7.5, pues necesitan mayor precaución por tratarse de radioactividad
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 7.5
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado de 2.5, porque el sistema no se podrá mantener sin la colaboración y normas adecuadas, que a pesar de existir son muy difícil de controlar.
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignara el valor de 10, pues por tratarse de equipos y principios básicos el mantenimiento es netamente mecánico.
- **Flotación por espuma:** Se asignara el valor de 10, al igual que el método anterior
- **Disolución selectiva y devolitizacion por destello:** Se le asignara el valor de 5, esto debido a que se necesita varias cámaras para funcionar, y al tratarse de altas presiones su mantenimiento debe ser constante.
- **Fricción electrostática:** Se asignara el valor de 10, porque el único elemento a mantenimiento en el sistema es el dispositivo mecánico que agitara el plástico mixturado y el correcto funcionamiento del transformador que genera el campo.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignara el valor de 7.5, debido a que su mantenimiento es mecánico y eléctrico.
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 10, pues sus equipos son simples y no requieren mantenimiento.
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignara el valor de 10, debido a que es un método artesanal que no requiere mantenimiento.

- **Análisis térmico:** Tendrá un valor de 7.5 porque es un equipo aunque es simple requiere mantenimiento en su aislamiento térmico como en la sus termocuplas y resistencias.

8. Riesgo humano: La cuantificación de este parámetro tendrá la subdivisión en la escala de 0 cuando el riesgo humano sea máximo, 2.5 cuando se grave pero se pueda trabajar pero no se recomienda, 5 cuando exista el riesgo pero se pueda trabajar con elementos de seguridad, 7.5 cuando no requiera mayor protección, y 10 cuando el riesgo sea nulo.

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignara el valor de 10
- **Rayos X:** Valor asignado de 5, porque siempre trabajar con radiación implica riesgos.
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 10
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado de 10.
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignara el valor de 10.
- **Flotación por espuma:** Se asignara el valor de 10.
- **Disolución selectiva y devolitizacion por destello:** Se le asignara el valor de 7.5, debido a que las grandes presiones afecta al organismo.
- **Fricción electrostática:** Se asignara el valor de 10, porque a pesar de trabajar con altos voltajes, es la intensidad la que puede matar al hombre.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignara el valor de 7.5 porque debe tener guardas de protección para no sufrir quemaduras graves.
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 10.
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignara el valor de 5, pues se debe tener protección al contacto con la llama, además de que los gases emitidos por la combustión de polímeros pueden ser dañinos a largo plazo.
- **Análisis térmico:** Tendrá un valor de 10

9. Riesgo ambiental: Este parámetro tendrá los mismos criterios de valoración del numeral anterior aplicados al medio ambiente.

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignara el valor de 10
- **Rayos X:** Valor asignado de 7.5, porque su mala utilización causara daños al medio ambiente
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 10
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado de 10
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignara el valor de 10, porque a pesar de que las soluciones de separación eventualmente serán desechadas y estas son no nocivas para el ambiente.
- **Flotación por espuma:** Se asignara el valor de 7.5, pues los químicos utilizados en este método pueden ser químicos menos biodegradables.
- **Disolución selectiva y devolitizacion por destello:** Se le asignara el valor de 10.
- **Fricción electrostática:** Se asignara el valor de 10.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignara el valor de 10
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 10
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignara el valor de 5, pues si se realiza en grandes cantidades es nocivo para el aire ya que el PVC libera cloro que es toxico
- **Análisis térmico:** Tendrá un valor de 10

10. Costos de implementación: Este parámetro se deriva, de manera lógica, del numeral 5, pues es casi una constante que mientras más dificultad existe, mayor será su costo. Pero en este caso el valor de 0 será para el método que represente mayor costo, y se incrementará en 2.5, 5, 7.5, hasta 10 para valorar el más económico.

- **Espectroscopia infrarroja:** Se le asignara el valor de 5 porque es necesario un selector de la longitud de onda y el sensor que reciba la señal luminosa.

- **Rayos X:** Valor asignado de 5, pues los equipos de radiación y los sensores necesarios son equipos de alta tecnología
- **Identificación laser:** Se le asignará el valor de 5 por igual razón que el método anterior.
- **Sistemas de marcación:** Valor asignado de 0 ya que por las dimensiones y la ambición de este método requerirá modificar todas las industrias.
- **Hundimiento Flotación:** Se le asignara el valor de 7.5, porque los equipos son básicos de la industria metalmeccánica.
- **Flotación por espuma:** Se asignara el valor de 7.5, al igual que el método anterior
- **Disolución selectiva y devolitizacion por destello:** Se le asignara el valor de 5, pues el trabajo con grandes presiones requiere mayor espesor de las cámaras y más equipos de control lo que incrementa el costo.
- **Fricción electrostática:** Se asignara el valor de 7.5, porque el único componente de alto costo es el transformador.
- **Temperatura de reblandecimiento:** Se le asignara el valor de 7.5 pues puede ser realizado por la industria metalmeccánica
- **Luz polarizada:** Se asigna el valor de 10, sus elementos no son costosos
- **Prueba de ensayo a la llama:** Se le asignara el valor de 10, ya que básicamente no necesita implementación
- **Análisis térmico:** Tendrá un valor de 7.5, similar al costo de un horno refractario, pero con mayores equipos y resistencias.

11. Costos de operación: Este parámetro se deriva, toma en cuenta, los insumos, la energía requerida, y elementos como el número de operarios necesarios para llegar a fin propuesto, con la misma valoración y lógica del numeral anterior.

- ***Espectroscopia infrarroja:*** Se le asignara el valor de 10 porque no necesita de insumos y sus equipos no requieren de mucha energía eléctrica.
- ***Rayos X:*** Valor asignado de 10
- ***Identificación laser:*** Se le asignará el valor de 10, por la misma razón que los dos anteriores.
- ***Sistemas de marcación:*** Valor asignado de 7.5 ya que una vez implementado el método, no existirá mayor costo de operación.
- ***Hundimiento Flotación:*** Se le asignara el valor de 7.5, por el costo de los solubles que es mínimo.
- ***Flotación por espuma:*** Se asignara el valor de 7.5, por los costos del espumante y el agente humectante
- ***Disolución selectiva y devolitizacion por destello:*** Se le asignara el valor de 7.5, pues llegar a altas presiones requieren de gran energía.
- ***Fricción electrostática:*** Se asignara el valor de 7.5, por el voltaje que consume corriente eléctrica pero en potencia no es de mayor magnitud.
- ***Temperatura de reblandecimiento:*** Se le asignara el valor de 7.5
- ***Luz polarizada:*** Se asigna el valor de 10, pues es únicamente la luz monocromática que consume menos que la bombilla normal
- ***Prueba de ensayo a la llama:*** Se le asignara el valor de 10, ya que no existe ningún costo.
- ***Análisis térmico:*** Tendrá un valor de 7.5, por la corriente utilizada por las resistencias y los elementos de medida.

12. Costos de mantenimiento: En este punto, que tiene estrecha relación con el punto 7, el rango será dividido en 0, 2.5, 5, 7.5, 10, siendo 0 el más costoso y 10 el más económico. Además se puede deducir que mientras más tecnificado o grande sea el equipo instalado mayor será su costo, así como también mientras más periódico sea, entonces:

- ***Espectroscopia infrarroja:*** Se le asignara el valor de 10 por el mantenimiento del AOTF y los sensores es mínimo
- ***Rayos X:*** Valor asignado de 7.5, porque tiene que ser con mayor periodicidad
- ***Identificación laser:*** Se le asignará el valor de 7.5 al igual que el anterior.
- ***Sistemas de marcación:*** Valor asignado de 7.5, pues el costo de mantenimiento es administrativo y mínimamente operativo
- ***Hundimiento flotación:*** Los costos de mantenimiento serán de 7.5 porque es mantenimiento mecánico exclusivamente.
- ***Flotación por espuma:*** Se asignara el valor de 7.5 por la misma razón anterior.
- ***Disolución selectiva y devolitizacion por destello:*** El costo de mantenimiento de este sistema es alto por su periodicidad y el desgaste de trabajar a altas presiones, por lo que tendrá un valor de 5
- ***Fricción electrostática:*** Se asignara el valor de 7.5, pues el mantenimiento es mecánico por el sistema de movimiento y eléctrico por el transformador
- ***Temperatura de reblandecimiento:*** Se le asignara el valor de 7.5, similar al anterior
- ***Luz polarizada:*** Se asigna el valor de 10, pues no existe mantenimiento
- ***Prueba de ensayo a la llama:*** Se le asignara el valor de 10, ya que no existe ningún costo.
- ***Análisis térmico:*** Tendrá un valor de 10, debido a que el mantenimiento del horno refractario es mínimo.

13. Accesibilidad en el Ecuador: Este criterio tendrá el valor de 10 si existe en el mercado nacional, 5 si no existe en gran numero y si no puede ser importado y 0 si no puede ser importado por diversos motivos.

- ***Espectroscopia infrarroja:*** Se le asignara el valor de 5
- ***Rayos X:*** Valor asignado de 5
- ***Identificación laser:*** Se le asignará el valor de 5
- ***Sistemas de marcación:*** Valor asignado de 0
- ***Hundimiento flotación:*** Los costos de mantenimiento serán de 10
- ***Flotación por espuma:*** Se asignara el valor de 10
- ***Disolución selectiva y devolitizacion por destello:*** El valor asignado es de 5, por no tener accesibilidad a los solventes.
- ***Fricción electrostática:*** Se asignara el valor de 10
- ***Temperatura de reblandecimiento:*** Se le asignara el valor de 10
- ***Luz polarizada:*** Se asigna el valor de 10
- ***Prueba de ensayo a la llama:*** Se le asignara el valor de 10
- ***Análisis térmico:*** Tendrá un valor de 5 puede ser fabricado o importado en un equipo de laboratorio

Por último para obtener el puntaje, se multiplica el valor relativo con el factor de peso de cada parámetro, después se suman los parámetros de cada alternativa y se escoge la alternativa con mayor valor. En nuestro caso escogeremos las 3 con mayor puntuación.

TABLA 3.2 MATRIZ DE DECISION

No.	PARAMETROS DE EVALUACION	Factor de peso WF	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA		RAYOS X		IDENTIFICACION LASER		SISTEMAS DE MARCACION		HUNDIMIENTO-FLOTACION		FLOTACION POR ESPUMA		DISOLUCION SELECTIVA Y DEVOLITIZACION		FRICCION ELECTROSTATICA		TEMPERATURA DE REBLANDECIMIENTO		LUZ POLARIZADA		ENSAYO A LA LLAMA		ANALISIS TERMICO	
			R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE	R.V.	PTJE
1	Capacidad de clasificacion	0,11	10,00	1,09	10,00	1,09	8,00	0,87	10,00	1,09	6,00	0,65	8,00	0,87	8,00	0,87	2,00	0,22	6,00	0,65	4,00	0,44	8,00	0,87	8,00	0,87
2	Afectacion al material	0,10	10,00	1,00	10,00	1,00	5,00	0,50	5,00	0,50	10,00	1,00	10,00	1,00	5,00	0,50	10,00	1,00	5,00	0,50	10,00	1,00	0,00	0,00	5,00	0,50
3	Velocidad de separacion	0,08	10,00	0,82	10,00	0,82	10,00	0,82	10,00	0,82	2,50	0,20	5,00	0,41	5,00	0,41	5,00	0,41	5,00	0,41	5,00	0,41	5,00	0,41	7,50	0,61
4	Automatizacion en la industria	0,11	10,00	1,09	10,00	1,09	10,00	1,09	5,00	0,55	10,00	1,09	10,00	1,09	10,00	1,09	10,00	1,09	10,00	1,09	5,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Facilidad de implementacion	0,04	7,50	0,27	5,00	0,18	5,00	0,18	0,00	0,00	7,50	0,27	7,50	0,27	5,00	0,18	7,50	0,27	7,50	0,27	10,00	0,36	10,00	0,36	7,50	0,27
6	Facilidad de manejo	0,05	10,00	0,45	7,50	0,34	10,00	0,45	7,50	0,34	5,00	0,23	5,00	0,23	10,00	0,45	7,50	0,34	7,50	0,34	7,50	0,34	7,50	0,34	7,50	0,34
7	Facilidad mantenimiento	0,04	7,50	0,27	7,50	0,27	7,50	0,27	2,50	0,09	10,00	0,36	10,00	0,36	5,00	0,18	10,00	0,36	7,50	0,27	10,00	0,36	10,00	0,36	7,50	0,27
8	Riesgo humano	0,13	10,00	1,27	5,00	0,64	10,00	1,27	10,00	1,27	10,00	1,27	10,00	1,27	7,50	0,95	10,00	1,27	7,50	0,95	10,00	1,27	5,00	0,64	10,00	1,27
9	Riesgo ambiental	0,08	10,00	0,82	7,50	0,61	10,00	0,82	10,00	0,82	10,00	0,82	7,50	0,61	10,00	0,82	10,00	0,82	10,00	0,82	10,00	0,82	5,00	0,41	10,00	0,82
10	Costos de implementacion	0,07	5,00	0,36	5,00	0,36	5,00	0,36	0,00	0,00	7,50	0,55	7,50	0,55	5,00	0,36	7,50	0,55	7,50	0,55	10,00	0,73	10,00	0,73	7,50	0,55
11	Costos de operacion	0,06	10,00	0,64	10,00	0,64	10,00	0,64	7,50	0,48	7,50	0,48	7,50	0,48	7,50	0,48	7,50	0,48	7,50	0,48	10,00	0,64	10,00	0,64	7,50	0,48
12	Costos de mantenimiento	0,05	10,00	0,55	7,50	0,41	7,50	0,41	7,50	0,41	7,50	0,41	5,00	0,27	5,00	0,27	7,50	0,41	7,50	0,41	10,00	0,55	10,00	0,55	10,00	0,55
13	Accesibilidad en el Ecuador	0,06	5,00	0,32	5,00	0,32	5,00	0,32	0,00	0,00	10,00	0,64	5,00	0,32	5,00	0,32	10,00	0,64	10,00	0,64	10,00	0,64	10,00	0,64	5,00	0,32
			8,95		7,77		8,01		6,36		7,97		7,74		6,90		7,85		7,38		8,10		5,94		6,85	

A continuación se ordenan los métodos según su conveniencia:

1. Espectroscopia infrarroja
2. Luz polarizada
3. Identificación laser
4. Hundimiento-flotación
5. Fricción electrostática
6. Rayos X
7. Flotación por espuma
8. Temperatura de reblandecimiento
9. Disolución selectiva y devolitizacion por destello
10. Análisis térmico
11. Sistemas de marcación
12. Ensayo a la llama

En el siguiente capítulo se estudiarán más a fondo los 7 primeros métodos, con la finalidad de poder realizar pruebas de cada método.

CAPITULO 4

ESTUDIO DE LOS METODOS SELECCIONADOS PARA SU IMPLEMENTACION

4.1 PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA LA IMPLEMENTACION EN LA INDUSTRIA DE LOS METODOS SELECCIONADOS.

4.1.1 HUNDIMIENTO-FLOTACION

La forma más simple de implementar este método para su real automatización es la construcción de varios tambores rotatorios de separación, con un sistema interno de bandejas transportadoras, y alimentación constante del fluido de separación como se muestra en las siguientes figuras a continuación:

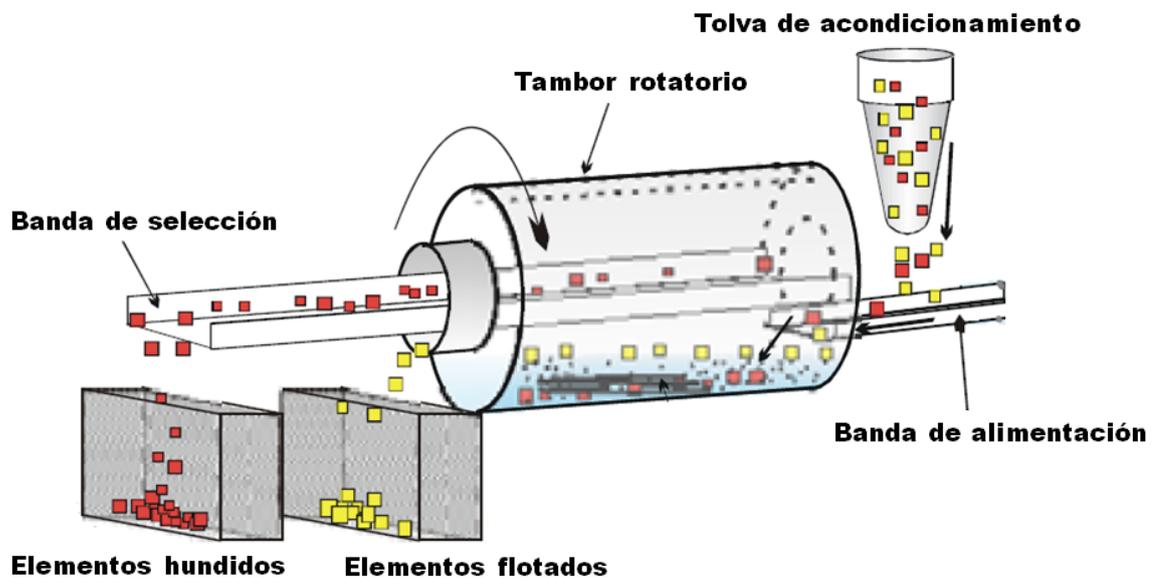


Figura 4.1 Esquema de tambor rotatorio para separación de plásticos por densidades¹⁶

¹⁶ Sorting Techniques for Plastics Recycling, Gjergj Dodbiba, Jun Sadaki, Atsushi Shibayama, Toyohisa Fujita

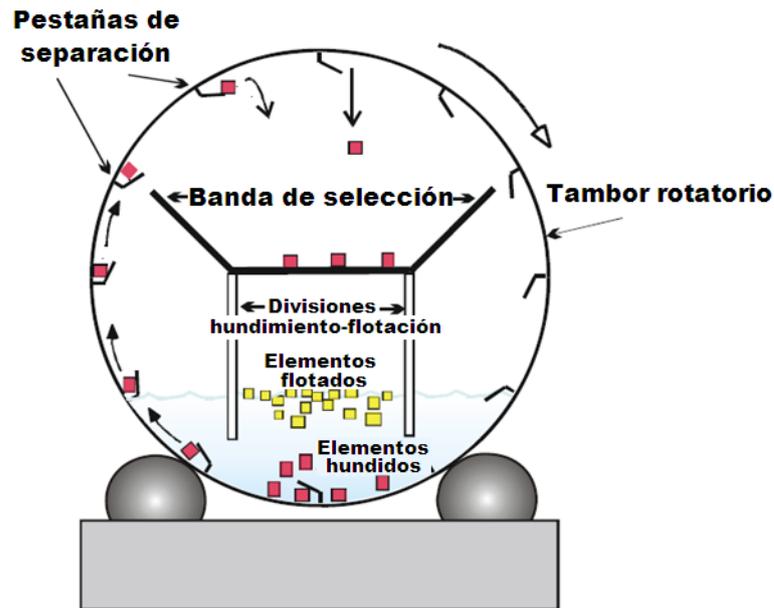


Figura 4.2 Esquema de tambor rotatorio para separación de plásticos por densidades¹⁷

Según la norma ASTM D618-00 los elementos para que tengan un mejor rendimiento hacia cualquier método de separación, deben ser acondicionados a 23°C con una tolerancia 2°C, y una humedad de 50% con una tolerancia de 5%, para espesores menores a 7mm lo cual concuerda con la lógica de la micro clasificación que busca eliminar otros fenómenos que se producen en la flotación. Cada tambor debe ser alimentado continuamente con soluciones de diferentes densidades, apropiadas para la separación de los plásticos según cierto orden, y deben ser parte en un sistema integral en serie para la industria. La manera más económica para lograr la densidad adecuada de estas soluciones es a base de sal y alcohol en diferentes concentraciones, aunque no son las únicas alternativas. A continuación se presenta un esquema que indica las densidades de las soluciones para cada separador.

¹⁷ Sorting Techniques for Plastics Recycling, Gjergj Dodbiba, Jun Sadaki, Atsushi Shibayama, Toyohisa Fujita

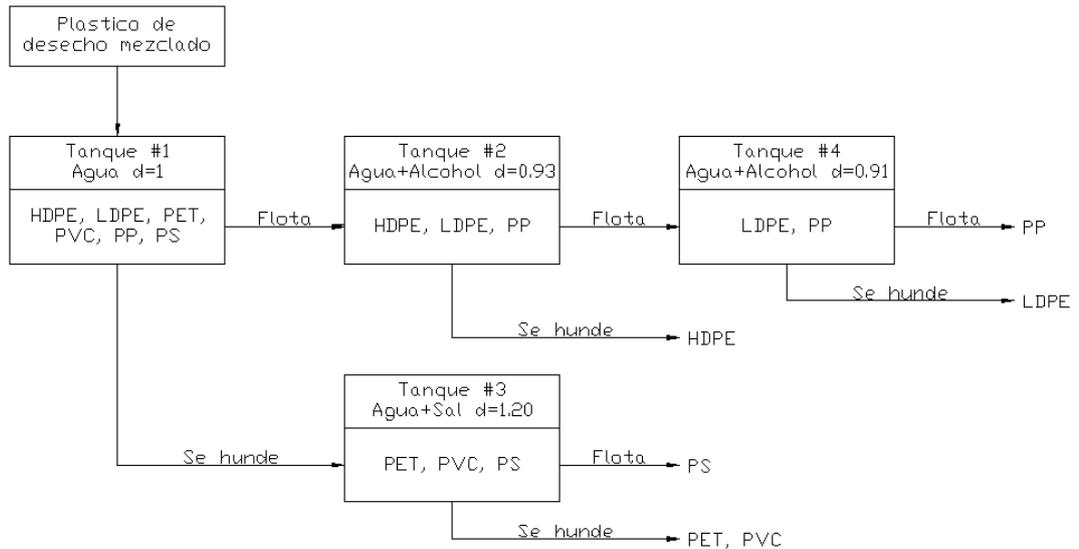


Figura. 4.3 Separación de resinas por diferencia de densidades¹⁸

La capacidad volumétrica de los tambores rotatorios de separación están determinados por la capacidad de la empresa en la que se montara el método que es de 1000 kg/día, tomando en cuenta que se trabajan 8 horas diarias, se deben separar 125 kg/h. Todos los estimados están en función de la menor densidad de los termoplásticos que nos interesa, y de la mayor densidad establecida para el líquido de separación en la fig. 4.3.

El proceso de hundimiento flotación es inmediato, pero se va a tomar la condición que los 125 kg de plástico demoran la hora completa para precipitarse como un factor de seguridad, además como polímero de medida se utilizara el PP por tener la densidad más baja, alrededor de 890 kg/m³, lo que significa que tiene mayor volumen por unidad de peso.

Bajo estas condiciones tenemos:

$$V_{polimero} = \frac{m_{desecho}}{\rho_{polimero \text{ de medida}}} \quad 4.1$$

$$V_{polimero} = 0.141m^3$$

¹⁸ Instituto Brasileiro del PVC

Tomando la recomendación que las celdas de flotación-hundimiento deben tener entre 1 a 100 litros de fluido de separación por cada kg de material de desecho plástico¹⁹, tenemos que debe haber entre 0.125 m³ a 12.500 m³ de solución acuosa, para lo cual tomamos la cuarta parte de este valor que es 3.100m³.

Sumamos el volumen necesario para el plástico y el volumen de la solución de capacidad, dando como resultado 3.241m³.

Es importante ver que en tambores rotatorios solo la mitad inferior separa el material, por lo cual el valor arrojado con estas consideraciones solo será de la mitad del volumen total del tambor. Por lo tanto la capacidad total del tambor es 6.482m³ para la estación número 1 que abarca el 100% del material a reciclar.

Para el dimensionamiento de los tambores en la siguientes estaciones tomamos en cuenta que van disminuyendo la cantidad de plástico de desecho en función de la demanda de las empresas hacia la importación de cada polímero en el Ecuador (Graf. 2.3), puesto que el objetivo es bajar estos índices, es así que se tienen los siguiente porcentajes: LDPE 24.71%, PVC 20.91%, HDPE 20.15%, PP 19.77%, PET 12.82%, PS 1.90%; obteniendo la siguiente tabla para dimensionar los tanques de separación.

Tabla 4.1 Dimensionamiento de los tanques de separación

TANQUE	DENSIDAD MAXIMA	PORCENTAJE CONTENIDO	CAPACIDAD MINIMA DEL TANQUE
1	910 Kg/m ³ (PP)	100%	6.48 m ³
2	910 Kg/m ³ (PP)	64.63%	4.18 m ³
3	1070 kg/m ³ (PS)	35.63%	2.30 m ³
4	910 Kg/m ³ (PP)	44.48%	2.88 m ³

Fuente: Propia

Esta tabla recoge la recomendación que las celdas de flotación-hundimiento deben tener entre 50 a 150 litros por cada 100 a 200 kg/hora de material

¹⁹ Un método y un aparato para separar material de desecho, OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

Es importante conocer el tiempo de hundimiento de cada polímero, en cada tanque puesto que se tiene que estar seguro de que todos los elementos deseados se hundan, pero buscando la eficiencia en relación con los tiempos de producción. En capítulos posteriores se realizarán pruebas de efectividad de las soluciones propuestas, del tiempo de decantación, y de la incidencia de la forma de los elementos polímeros en el proceso.

4.1.2 FLOTACION POR ESPUMA

Como se había mencionado, este método se basa en la adhesión de las moléculas de aire a la superficie de los plásticos, es decir el plástico es modificado de su hidrofobia natural a hidrófilo, para flotar más fácilmente. Lastimosamente la mayoría de los plásticos utilizados en la industria son hidrófobos, por lo que se requiere un proceso previo antes de someterlos al fluido de separación.

Dentro de los procesos que se han encontrado para volver hidrófilos a los plásticos está el de exponerlos a cierto nivel de plasma produciendo un cambio en la superficie del material a hidrófilo, que después de cierto tiempo vuelve a ser hidrófobo, la clave de este proceso es que cada uno de los polímeros requiere de diferentes tiempos para volver a ser hidrófobos.

Se recomienda que el plasma utilizado sea de oxígeno, y que sea expuesto a la mezcla de materiales de 5 a 10 segundos a una presión de 10 Pa si es solo para una prueba de laboratorio, o de 30 Pa por cada 1.5 Kg con una exposición de 60 a 120 segundos. Es importante para que este proceso sea efectivo que las partículas estén suficientemente dispersas, aunque no existen limitaciones con respecto al tamaño de las mismas.

El siguiente paso, después de el tiempo de preparación del material, es colocar al plástico dentro de una solución acuosa con un agente tensoactivo, que ayuda a disminuir la tensión superficial, así como también ayuda a humedecer al material, y se añade en cantidades de 0.001-10 gramos por kilogramo de material de desecho. Algunos de los tensoactivos utilizados son: entre otros Alconox,

detergente anionico, Alcojet, detergente en polvo poco espumante, Flotanol, fabricado por Hoechst AG, y tensoactivos de alcoxilato de alcohol.

Al obtener la solución de agua adecuada, esta debe ser constantemente controlada en todas sus características, y se le inyecta aire al sistema, para que puedan ser retenidas por la moléculas hidrófilas y flotar permitiendo su clasificación.

Se ha observado también que en este método es una variable a considerar el pH de la solución acuosa, así como también la temperatura de la misma, por lo menos en algunos plásticos, puesto que la hidrofiliidad puede depender de estos aspectos.

Además de este proceso de plasma que no discrimina a los diferentes polímeros, pero que puede llegar a ser complicado por el uso del plasma, existen otros estudios del mismo método que solo se enfoca en la separación del PET del PVC, ya que este no puede ser separado mediante el método de hundimiento-flotación común, antes detallado, por tener densidades similares. Este proceso utiliza al Polivinil Pirrolidona (PVP) como medio de separación acuoso humectante, y Metil Isobutil Carbinol (MIBC) o también llamado Alcohol Metil Amílico como agente espumante, en concentraciones de 0.0025 mg/l de PVP hasta 0.01 mg/l de PVP en solución acuosa.

Para los métodos de separación de polímeros que utilizan como principio la flotación, es necesario triturar el plástico en pequeños gránulos, para así controlar fenómenos que podrían alterar los resultados como el empuje, y la superficie de contacto.

Según estudios anteriores, para una celda de flotación con capacidad de 1.8 litros son necesarias tan solo 6 gotas de MIBC para estabilizar las burbujas de aire que deben ser inyectadas a la celda constantemente, tomando un promedio de 10

minutos para que el PVC se hunda, mientras que los elementos de PET flotarán hasta la superficie.

Este sistema requiere que los elementos que flotarán sean dispuestos nuevamente al proceso añadiendo 3 gotas más de MIBC por cada reproceso, siendo lo recomendable llegar a 3 etapas posteriores a la inicial.

El mismo método puede ser usado para separar PP del PE utilizando Alcohol Polivinílico (PVA) a 2000 ppm como medio de separación acuoso huecamente, en cantidades de 1.8 Kg hasta 2.9 Kg por tonelada de plástico mixto, y Aceite de Pino como agente espumante, en cantidad de 10 gotas aproximadamente, ya que tienen densidades diferentes, pero con un rango de diferenciación casi nulo en algunos casos. En esto proceso el polímero que flota es el PP mientras que el PE se hunde.

4.1.3 INFRARROJO

Este sistema es de gran aplicación, puesto que por la velocidad en la clasificación de los plásticos es de tiempo real, y a diferencia de la radiación X, que fue el método que desarrollo la tecnología para la identificación de plásticos, que identifica mediante la reacción de un simple ion o elemento, la espectroscopia infrarroja identifica al material por su naturaleza orgánica

El dispositivo de infrarrojo de preferencia debe tener alimentación de nitrógeno a la fuente para evitar errores en la medición manteniendo el ambiente libre de oxígeno.

Existe un modelo del equipo que puede aplicarse a la industria, mediante una banda transportadora. Este equipo consta de unos focos halógenos con diferentes orientaciones para iluminar los envases, y aumentar la probabilidad de que uno de los haces reflejados alcance el equipo de clasificación.

Al otro lado del elemento a identificar se coloca una superficie reflejante de aluminio. Así el espectro es una mezcla de luz reflejada y transmitida que aumenta la señal y no perjudica en nada a la identificación. La luz se recoge en un instrumento que obtiene los espectros. Los datos obtenidos se procesan para identificar el plástico que está siendo analizado ese instante.

En el siguiente grafico se esquematiza el aparato de medición.

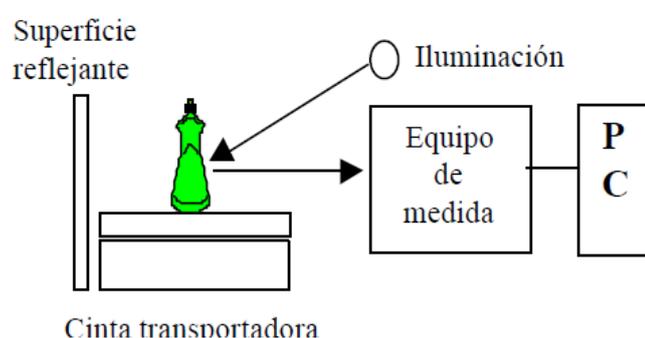


Figura. 4.4 Esquema de funcionamiento-equipos de clasificación infrarrojo²⁰

El equipo de medida está basado en un filtro acústico-óptico sintonizable (AOTF), el mismo que actúa como una red de difracción que puede seleccionar una longitud de onda determinada en función de la radiofrecuencia con la que se hace vibrar. Su gran ancho de banda permite recoger un espectro en una fracción de segundo.

Dentro del equipo, en primer lugar están las lentes de colimación que permiten recoger la luz reflejada por los envases y dirigirla hacia los siguientes elementos de forma adecuada. Es necesario colimar el haz ya que solo así puede lograrse una alta eficiencia en el conjunto de polarizadores y AOTF. Este solo admite un haz que incida dentro de $\pm 3^\circ$ en vertical y $\pm 5^\circ$ en horizontal.

²⁰ Clasificación automática de envases plásticos, J.M. Barcala Riveira, J. Alberdi Primicia, J.J. Navarrete Marín, J.C. Oller González

A continuación encontramos un filtro que limita el paso de la luz visible mientras permite el paso del infrarrojo. Este filtro consiste en una lámina de Si, material que absorbe hasta una longitud de onda de 1200 nm aproximadamente que es donde comienzan las medidas.

El haz transmitido alcanza un polarizador que solo deja pasar la luz polarizada linealmente según cierta dirección rechazando el resto en una dirección perpendicular a la de incidencia.

El siguiente elemento es el AOTF. Este selecciona la longitud de onda de nuestro interés que sale en un haz desviado unos 7.3° respecto a la línea de incidencia.

Además, debido a un efecto no lineal del AOTF, la polarización de este haz ha girado 90° respecto a la polarización que tenía a la entrada. Esta característica permite bloquear la parte de luz que no nos interesa colocando otro polarizador igual que el primero pero rotado 90° .

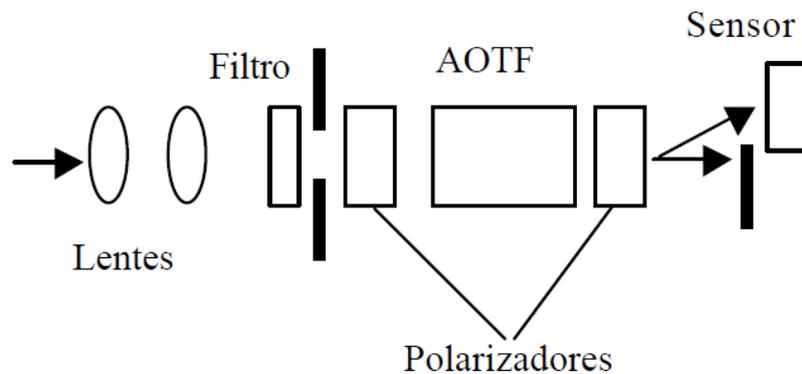


Figura 4.5 Esquema del equipo identificador²¹

Por último nos encontramos en el sensor, separado ligeramente del eje del aparato debido al ángulo de 7.3° con el que emerge el haz difractado. El sensor es un fotodiodo de germanio sin refrigerar conectado a un convertidor A/D.

²¹ Clasificación automática de envases plásticos, J.M. Barcala Riveira, J. Alberdi Primicia, J.J. Navarrete Marín, J.C. Oller González

Todo el sistema está gobernado por un PC al que se conecta tanto el digitalizador como el generador de RF que sintoniza el AOTF. En el PC corre una aplicación, desarrollada en LabVIEW, que controla los equipos, permite el análisis de los datos y su registro en ficheros.

A continuación se presentan los espectros obtenidos por el AOTF y el sensor para cada polímero:

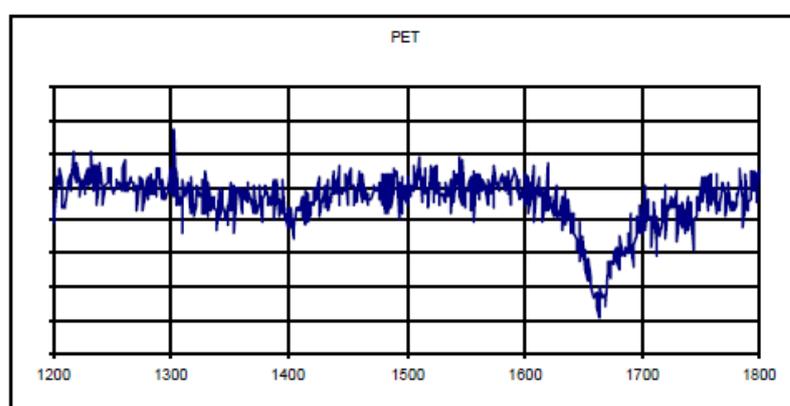


Figura 4.6 Espectro IR del PET²²

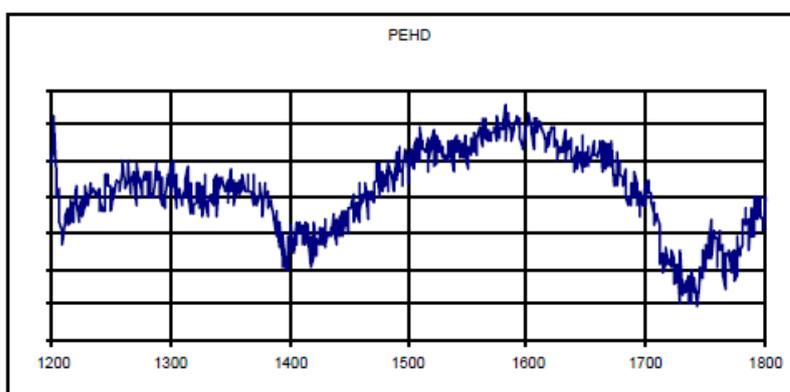


Figura 4.7 Espectro IR del PEAD²²

²² Clasificación automática de envases plásticos, J.M. Barcala Riveira, J. Alberdi Primicia, J.J. Navarrete Marín, J.C. Oller González

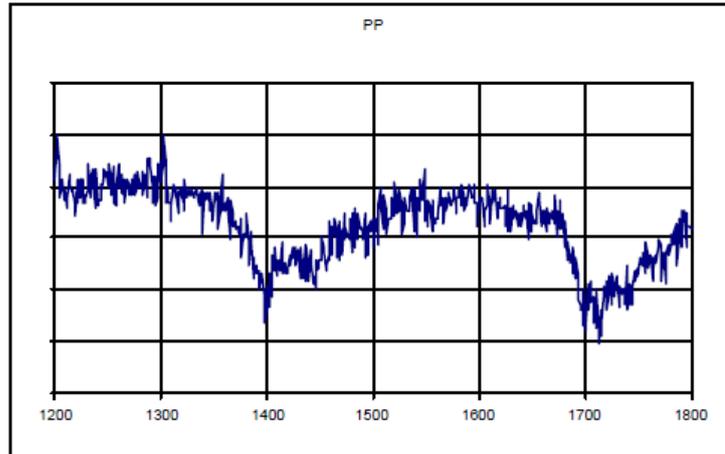


Figura 4.8 Espectro IR del PP²³

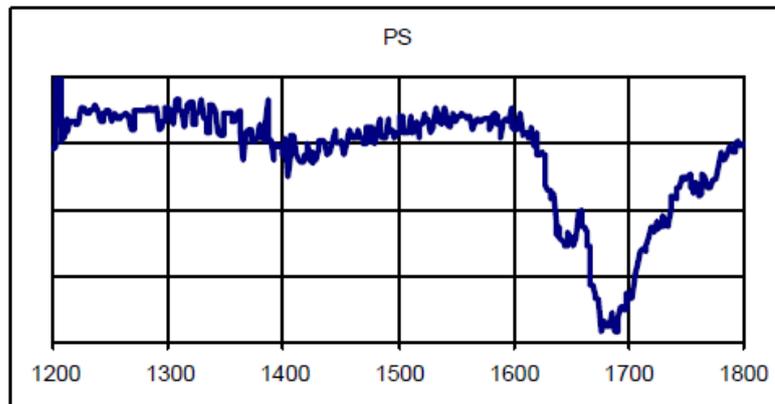


Figura 4.9 Espectro IR del PS²³

4.1.4 IDENTIFICACION POR LASER – ESPECTROMETRIA RAMAN

Por las razones vistas en el capítulo anterior respecto a este método de clasificación, la única razón justificable para emplear el laser como haz electromagnético es emplear la espectroscopia raman, por la débil intensidad del fenómeno, por lo cual es mayormente eficiente si se efectúa con el laser.

El laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es un oscilador óptico que emite un haz de fotones con idénticas propiedades vectoriales y escalares: alta potencia, monocromaticidad, coherencia y unidireccionalidad. El

²³ Clasificación automática de envases plásticos, J.M. Barcala Riveira, J. Alberdi Primicia, J.J. Navarrete Marín, J.C. Oller González

fenómeno físico está basado en la propiedad que tienen algunos materiales que cuando son excitadas por una fuente de energía, en general corriente eléctrica, liberan parte de esta energía adquirida en forma de fotones; es lo que se conoce como emisión espontánea. A su vez, los fotones liberados pueden repetir el proceso al interactuar con otros electrones del mismo material que generan más fotones idénticos; es lo que se conoce como emisión estimulada. La intensidad de la energía resultante se puede amplificar al reflejarse los fotones repetidamente en dos espejos paralelos colocados en el dispositivo. El efecto final es un haz de fotones, con las mismas características (fase, frecuencia y dirección), equivalente a una cantidad de energía superior a la utilizada para estimular la emisión inicial.

Existen dos grupos de láseres, los de alta potencia, y los de baja potencia, los cuales se detallan a continuación.

Tabla 4.2 Láseres utilizados en la industria

MEDIO	LONGITUD DE ONDA (nm)	APLICACIONES
Nd:YAG	1,064	Varios procesos en metales (Soldadura) Medicina (Cirugía, ojos) Milicia (guía y localizaciones)
CO2	10,600	Procesamiento de materiales Cirugía
Argon	488-514	Inspección Entretenimiento Tratamiento de ojos
GaAs-Diodo	670,840	Inspección, sistemas de visión Lectores de códigos de barras Punteros laser Lectores de CD
Excimer	193,248	Foto grabado Fotografía
Colores	400-600	Espectroscopia Tarjetas electrónicas
Ruby	6,943	Perforación de metales
HeNe	632,8	Interferometría, holografía, espectroscopia, código de barras, alineación, demostraciones ópticas.

Fuente: <http://industrial-lasers.net/lasertypes.html>

La elección del laser está en función de la resolución que se desea obtener, y esta resolución es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la cuarta potencia, así que los láseres de argón y de helio neón o AS-GA son los más indicados para obtener un espectro de gran resolución.

Después de excitar las moléculas de la muestra, es recomendable canalizar la luz del laser dispersa por medio de fibras ópticas, ya que estas atrapan a la luz en el núcleo y es direccionada mediante reflexiones internas. Dentro del equipo de identificación existen varias partes, donde la primera al igual que en la espectroscopia infrarroja es un filtro interferencial que permite únicamente el paso de la frecuencia del laser y elimina el espectro de la propia fibra óptica y o las líneas de plasma provocadas por el laser. De la misma manera simulando a los colimadores utilizados en la espectrometría IR, en la espectrometría Raman se utilizan lentes de focalización para direccionar la dispersión hacia el elemento de medición. Y por último se utiliza el filtro notch que sirven para eliminar el efecto Rayleigh que es el mismo fenómeno que el Raman pero en el cual la luz dispersa es de la misma frecuencia que la incidente.

A pesar de que al igual que en la espectroscopia infrarroja se puede utilizar un filtro acústico óptico sintonizable como instrumento de delimitación del espectro previo a la medición, en la espectrometría Raman, se utiliza con mayor frecuencia el CCD (Charge Coupled Device), posterior a un monocromador que dispersa y filtra las diferentes componentes de longitud de onda en diferentes ángulos, para que el CCD una todo el espectro y sea enviado digitalmente a un ordenador. El CCD mediante un arreglo de condensadores convierte los fotones en carga eléctrica, guarda esta carga y finalmente es convertida en cuentas por segundo, digitalizándola para el ordenador.

A continuación están los espectros obtenidos de algunos de los polímeros más comunes:

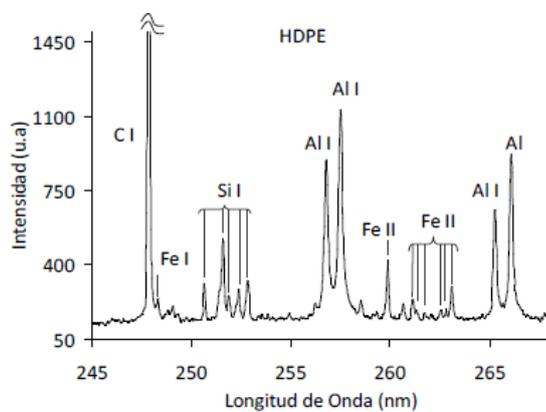


Figura 4.10 Espectro Raman del PEAD²⁴

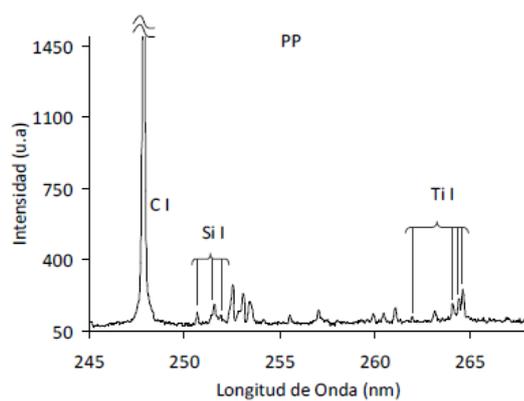


Figura 4.11 Espectro Raman del PP²⁴

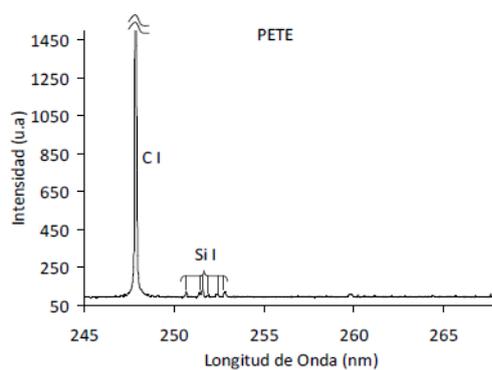


Figura 4.12 Espectro Raman del PET²⁴

²⁴ Identificación de polímeros mediante espectroscopia de emisión de plasmas producidos por laser (LIBS), Daniel Díaz, David W. Hahn, Alejandro Molina

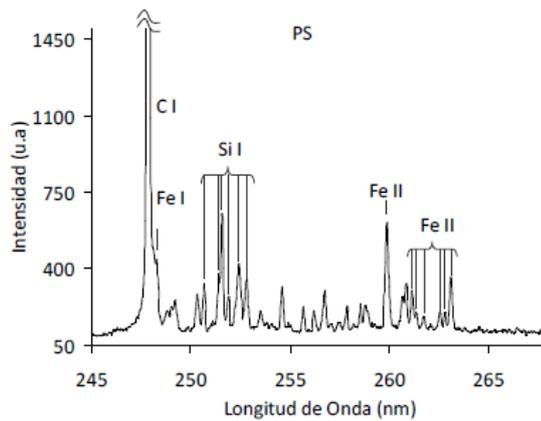


Figura 4.13 Espectro Raman del PS²⁵

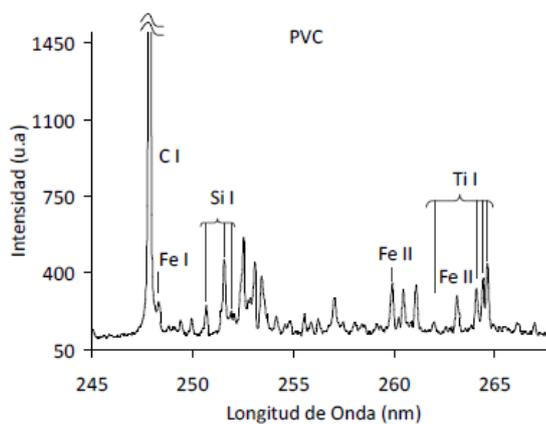


Figura 4.14 Espectro Raman del PVC²⁵

La ventaja de este proceso es que no se requiere ningún tipo de preparación a la muestra a analizar, y aunque algunos investigadores rechazan esta técnica de selección de plásticos, hay otros que la prefieren sobre los otros métodos por los siguientes motivos: la difracción de rayos x solo permite determinar la composición a nivel atómico de cristales y aleaciones inorgánicas muy bien ordenadas, la espectroscopia de fotoelectrones permite la identificación de compuestos sólidos superficiales y necesita de ultra vacio, la espectroscopia de IR permite analizar la composición química de sólidos orgánicos e inorgánicos pero se dice que requiere de la preparación de muestras muy delgadas para que sean transparentes al IR, la

²⁵ Identificación de polímeros mediante espectroscopia de emisión de plasmas producidos por laser (LIBS), Daniel Díaz, David W. Hahn, Alejandro Molina

florescencia de rayos x permite solo un análisis por elemento de sólidos, y requiere de vacío y protección para el operario.

4.1.5 RAYOS X

Este método de forma más puntual se lo conoce como *Fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersa (EDXRF)*. El principio de este procedimiento está en la excitación de los electrones de los elementos que contiene cada material, mediante su exposición de rayos X, dicha radiación expulsa a electrones de la capa mas interna de los átomos (denominado nivel “s” o “k”), ocasionando que los electrones de las capas más externas ocupen dichas vacantes, produciendo fotones como producto del exceso de esta energía disipada. En vista de que la radiación por fluorescencia es característica para cada elemento, es posible identificar la mayoría de materiales, a través del espectro de la muestra, como la intensidad de la radiación en función de la energía.

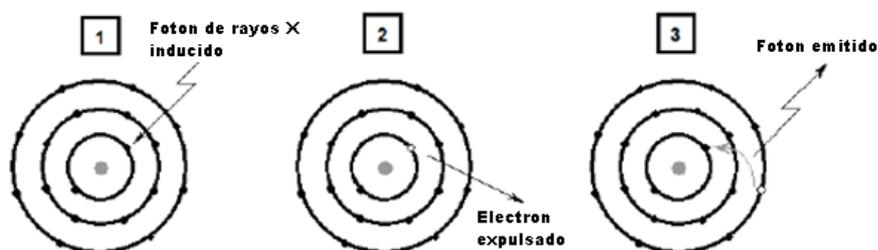


Figura 4.15 Principio de obtención del espectro por rayos X²⁶

Para una mayor eficiencia con relación al tiempo se recomienda usar un tubo de rayos X para irradiar a la muestra, pero también se pueden usar fuentes de bajo poder en un reducido espectro, como por ejemplo con isotopos de cadmio Cd¹²⁹, isotopo de cobalto Co⁵⁷, isotopo de hierro Fe⁵⁵, pero la ventaja del tubo es que puede procesar elementos de hasta 6.5mm aproximadamente, e incrementa su velocidad de clasificación. Es recomendable pero no necesario aplanar los elementos previamente, para obtener una mayor área a ser irradiada, y además de permanecer estático sin rodar, el elemento aplanado minimiza la radiación sobre el entorno. Pero para este paso previo, se debe tener en cuenta que

²⁶ <http://digitalunion.osu.edu/r2/summer09/mason/PDFs/XRF.pdf>

elementos externos han sido removidos. Es una variable a tomar muy en cuenta el entorno de la muestra, ya puede encontrarse en elementos que al ser irradiados, formen espectros dentro del rango, para este fin es recomendable direccionar la radiación hacia las piezas, mediante un colimador cuyos componentes no alteren el espectro predefinido. De igual manera se recomienda lo mismo para la fluorescencia que es captada por el detector. Es de importancia conocer que la fluorescencia emitida por un objeto al ser irradiado, es proporcional al número de átomos que lo conforma, es así que el este método no es de gran utilidad para identificar el PVC puesto que tiene bajo número de átomos en su estructura, por lo cual es una buena opción procurar que el entorno de la pieza a estudiar sea el PVC.

A partir de este punto, cada espectro detectado por el sistema, se almacena y compara con un patrón predefinido es una CPU, mediante un PLC que genera el espectro para su respectiva identificación.

El elemento fundamental de este método es la unidad de identificación, en donde se necesita una fuente de poder de 300 W para rayos X, que puede ser una Spellman DXM de 20kV (Spellman High Voltage Electronic Corp.), y un tubo de rayos X enfriado por agua, que puede ser un Varian OEG 76h (Varian medical systems). Además de estos elementos, el detector de la fluorescencia emitida debe ser un diodo SI-PIN (Silicon de tres capas), y una ventana de berilio para admitir rayos X de baja energía, el cual debe tratarse con cuidado puesto que mucha radiación, no permite un buen funcionamiento del mismo, reduciendo su exactitud por sobrecargarse y no distinguir todas las fluorescencias de la radiación, para lo cual se debe procurar una radiación de baja potencia relativa. Después de esto, el detector manda una señal a un amplificador, que a su vez lo envía a un modulo de adquisición de espectros, que puede ser un Amptech MCA 5000, para captar varios espectros discretos a diferentes niveles de energía. Después de este punto, se pueden utilizar varios algoritmos para la identificación de la muestra, una de ellas es utilizar los espectros (longitudes de onda) y sus

diferentes niveles de energía normalizados, como componentes de un vector unitario, característico para cada elemento, formando un patrón que llega a la unidad.

4.1.6 LUZ POLARIZADA

Como se vio anteriormente este método si bien es cierto es binario, y no representa un método automatizado de identificación de polímeros, además de que puede ser empleado únicamente para objetos translucidos, puede ayudar y optimizar el tiempo de clasificación de los polímeros de la manera que se la está desarrollando hoy, y seguramente dará paso a nuevas técnicas de clasificación.

Para empezar es recomendable utilizar una fuente de luz monocromática que puede ser una lámpara de sodio o de mercurio. De esta fuente se polariza la luz con filtros polarizadores que tengan medición angular por ser experimental, y se probara también con la luz polarizada circular que es una variación de este fenómeno, basado en la birrefringencia, en la que se puede añadir un filtro, o se cambia de polarizador.

A continuación se presenta un esquema del equipo identificador de luz polarizada, en la cual se ve claramente que la cinta transportadora está diseñada a manera de malla o rejilla para dejar pasar el haz de luz.

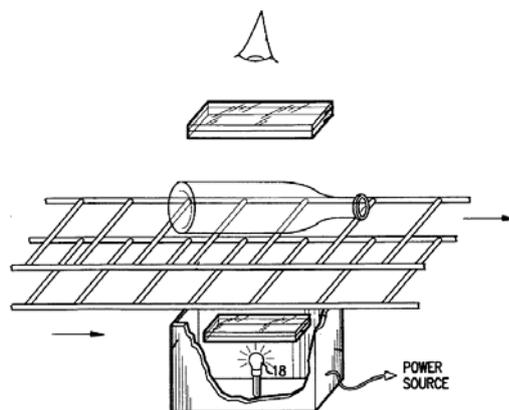


Figura 4.16 Esquema para implementación de luz polarizada²⁷

²⁷ System for sorting post-consumer plastic containers for recycling, US Patent, Patent Number 5,894,939, Apr. 20, 1999

4.1.7 FRICCIÓN ELECTROSTÁTICA

El fenómeno que carga a los elementos con cierta polaridad mediante contacto dependiendo de cuál sea su superficie de contacto se llama triboelectricidad, y se fundamenta en la capacidad de los materiales de cargarse positiva o negativamente al rozar con otro material distinto por el traspaso de electrones que se genera entre sus átomos como tendencia a emular a un gas noble, por ser los elementos más estables.

Para que se produzca esta transferencia de cargas no es necesario el frotamiento; mediante contacto también se produce esta transferencia, pero al frotar se renuevan continuamente los puntos de contacto por donde se transfieren las cargas, y por ende tiene el mismo efecto que si aumentáramos la superficie real de contacto.

La secuencia triboeléctrica es de gran importancia al momento de diseñar un mecanismo que utilice este método, ya que al frotar dos materiales de la secuencia, el que esté en la posición más alta se cargará positivamente, mientras que el que se sitúe más abajo se carga negativamente. Además cuanto más separados estén los materiales en la tabla, más intensa es su electrización. Los materiales se enumeran a menudo en el orden de la polaridad de la separación de la carga cuando se tocan con otro objeto. Un material hacia el fondo de la serie, cuando está tocando a un material cercano al tope de la serie, logrará una carga más negativa, y viceversa. Cuanto más lejos están los dos materiales en la serie, mayor es la carga transferida. Estas tablas, aunque orientativas, no siempre son ciertas, puesto que dependen del estado de las superficies que se ponen en contacto, de la humedad, del frotamiento, y de otros factores.

Los materiales cercanos en la serie pueden no intercambiar el uno con el otro ninguna carga, o pueden intercambiar lo contrario de lo que es implicada por la lista. Esto depende más de la presencia del frotamiento, la presencia de contaminantes o de óxidos, o sobre características con excepción en del tipo de

material. La carga también varía para otros materiales como se muestra en la siguiente tabla:

Aire
Piel (Seca)
Vidrio
Cabello Humano
Mica
Nylon
Lana
Plomo
Seda
Aluminio
Papel
Algodón
Acero
Madera
Ámbar
Caucho
Vidrio epóxico
Níquel
Cobre
Plata
Oro, Platino
PET
PS
Acrílico
Celofán
PU
PE
PP
PVC
Teflón
Silicón

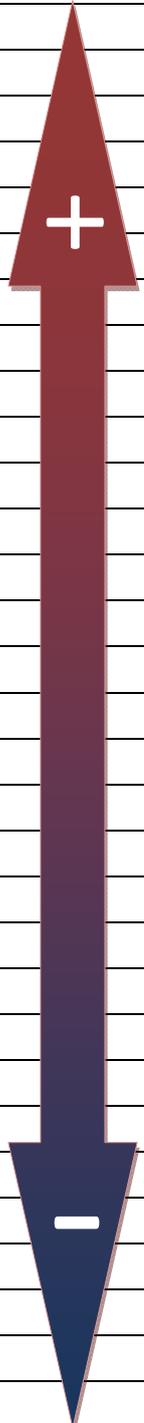


Figura 4.17 Serie triboeléctrica

Esta propiedad varía proporcionalmente con la función de trabajo, que es la energía mínima para arrancar los electrones de los sólidos.

Como se puede ver en la serie triboeléctrica, los polímeros de mayor importancia para el reciclaje están muy cerca en la secuencia, lo que implica que si no se realiza un proceso de limpieza y estandarización de las condiciones previas al proceso, existe el riesgo de que no sea eficaz.

Este método por naturaleza es de selección binaria, puesto que solo puede cargar positiva o negativamente al elemento, como se muestra en el siguiente esquema:

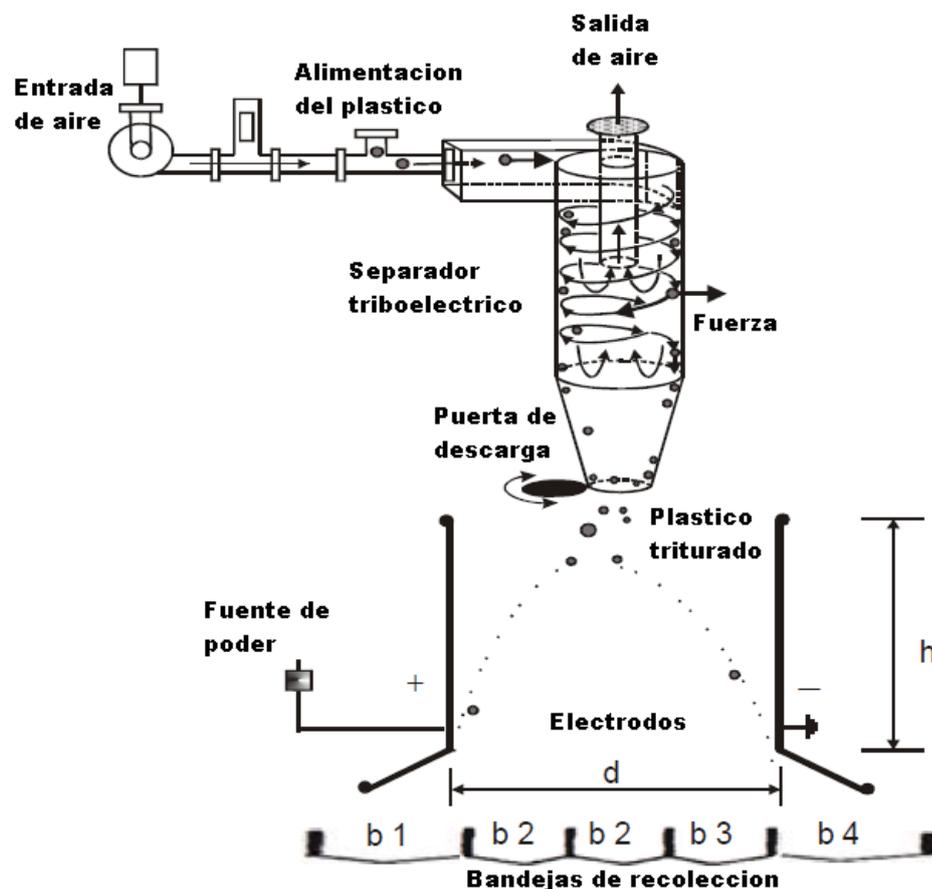


Figura 4.18 Esquema de implementación del proceso de fricción electrostática²⁸

²⁸ Sorting Techniques for Plastics Recycling, Gjergj Dodbiba, Jun Sadaki, Atsushi Shibayama, Toyohisa Fujita

El esquema anterior muestra un aparato diseñado por el Departamento de Ingeniería en Geosistemas, de la Universidad de Tokio en el 2006, para la separación del PS del ABS puesto que tienen similar densidad.

El recubrimiento interno de este mecanismo es de PET debido a que por estudios previos dados por el mismo departamento, es el polímero que se sitúa en el medio de los dos elementos a clasificar y por cuestiones técnicas de fabricación es el más conveniente.

Polymer type	Density (kg/m ³)	Triboelectrostatic series ^[3]
Acrylonitrile–butadiene–styrene, ABS	1 060	
Polyethylene terephthalate, PET	1 350	
Polystyrene, PS	1 050	
Polyethylene, PE	960	
Polypropylene, PP	900	
Polyvinyl chloride, PVC	1 400	

Figura 4.19 Serie triboeléctrica de algunos polímeros²⁹

Según la figura anterior el ABS se cargara positivamente mientras que el PS se cargara negativamente en contacto con la superficie del PET y de los elementos a identificar entre si, por lo que no importa si las partículas chocan entre sí, para posteriormente dejarlos caer libremente entre dos placas cargadas con polos opuestos, para que atraigan a las partículas hacia 2 contenedores.

En particular este mecanismo es operado con un campo eléctrico entre placas de $E=240\text{kv/m}$, una temperatura $T=29^\circ\text{C}$, y una humedad $H=49\%$, como variables más importantes por lo expuesto anteriormente.

Como hemos visto, los materiales a seleccionar determinan el material constitutivo del ducto por el cual se cargan los elementos, por ejemplo el método se puede variar modificar a un mecanismo que seleccione el PVC del PET, puesto que también tienen similar densidad.

²⁹ Sorting Techniques for Plastics Recycling, Gjergj Dodbiba, Jun Sadaki, Atsushi Shibayama, Toyohisa Fujita

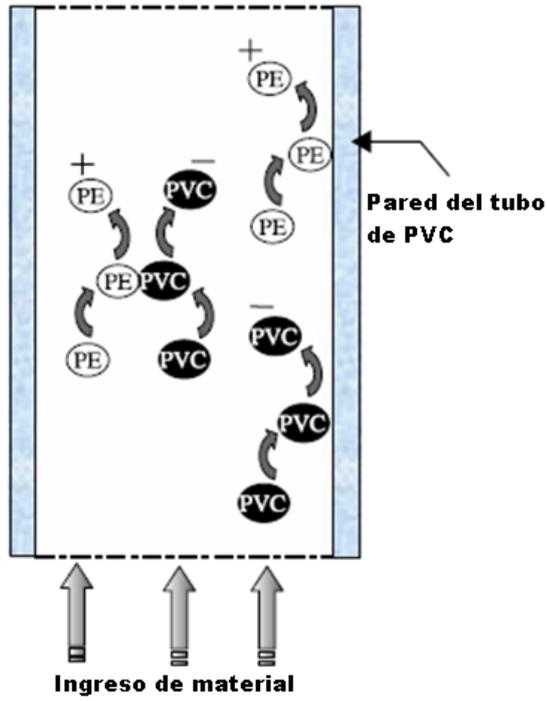


Figura 4.20 Esquema del proceso de carga PET – PVC³⁰

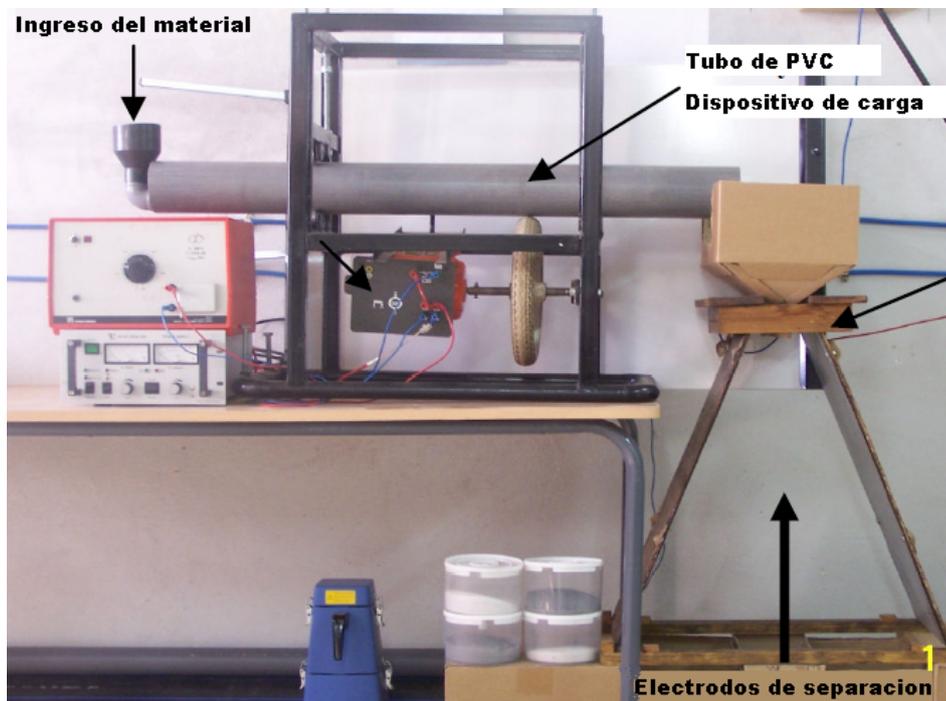


Figura 4.21 Fotografía de mecanismo de separación de PET-PVC por fricción electrostática³⁰

³⁰ Roll-type versus Free-fall Electrostatic Separation of Tribocharged Plastic Particles, Amar Tilmatine, Karim Medles, Mohamed Younes, Abdelber Bendaoud

Este dispositivo tiene como sección de carga triboeléctrica un tubo de PVC, por lo que es importante procurar un contacto de las partículas a separar, simulando un lecho fluidizado para cargar los elementos, puesto que los elementos de PVC no se cargan con el tubo.

El voltaje mínimo necesario para que la separación tenga éxito se puede calcular sabiendo que para una separación óptima la fuerza eléctrica ejercida en el campo debe ser mayor que la fuerza de gravedad, así tenemos que:

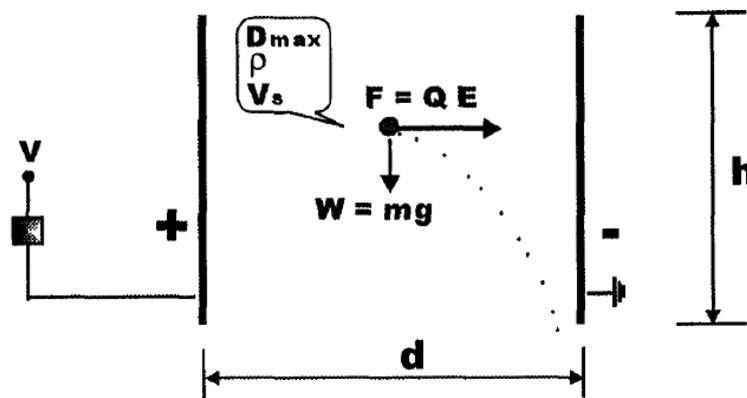


Figura 4.22 Esquema de las fuerzas aplicadas a la separación electrostática³¹

$$F > W \quad 4.2^{31}$$

$$Q * E > m * g \quad 4.3^{31}$$

si

$$E = \frac{V}{d} \quad 4.4^{31}$$

y la carga eléctrica del pedazo de material es;

$$Q = 4\epsilon_0\epsilon_r\pi rV_s \quad 4.5^{31}$$

³¹ Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone, G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita

Donde V_s es el voltaje de la superficie del elemento plástico, medido por un voltímetro electrostático de no contacto, y r es la distancia entre el elemento plástico y el instrumento de medida.

Y teniendo que;

$$m = \rho \frac{\pi}{6} D^3 \quad 4.6^{31}$$

Obtenemos como resultado que;

$$V > \left(\frac{g}{24\epsilon_0\epsilon_r} \right) \left(\frac{\rho D^3 d}{rV_s} \right) \quad 4.7^{31}$$

Además sabiendo que;

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 * \frac{10^{-12} C^2}{Nm^2}$$

$$\epsilon_r \text{ aire} = 1.0056$$

La expresión nos queda;

$$E > 4.59 * 10^{10} \left(\frac{\rho D^3 d}{rV_s} \right) \quad 4.8^{31}$$

Donde D es el diámetro del elemento triturado,

De todos los métodos es más utilizado actualmente es el de infrarrojo, puesto que su espectro es proporcionado de la naturaleza orgánica del material, y no de un solo ion o elemento como es el caso de los rayos X.

4.1.8 PRUEBA DE ENSAYO A LA LLAMA

Los elementos al exponerse a la llama presentan diferente coloración de la misma. Este fenómeno se debe que a átomos de los compuestos del elemento que han pasado a estados energéticos excitados debido a que absorben energía de la llama; los átomos que han sido excitados buscan llegar de la manera más rápida posible a su estado natural de equilibrio por lo que pueden perder su exceso de energía por radiación (emisión de luz), y puesto que los estados excitados posibles son característicos de cada especie, se tendrá una longitud de onda característica.

Este fenómeno está regido por la ley de Planck, que expresa lo siguiente:

$$E = h * f \quad 4.9^{32}$$

donde

E es la diferencia de energía entre estado excitado y fundamental

h es la constante de Planck $6,62 \times 10^{-34} \text{ J*s}$; y

f es la frecuencia del fotón emitido

³² Iniciación a la física, Julián Fernández Ferrer, Marcos Pujal Carrera, Editorial Reverté

CAPITULO 5

PRUEBAS DE APLICACIÓN DE LOS METODOS SELECCIONADOS

5.1 PRUEBAS DE LABORATORIO SEGÚN EL METODO SELECCIONADO.

Los polímeros que se van a utilizar para las pruebas son de naturaleza conocida y entregados, en su mayoría por el departamento de inyección de plásticos del colegio Don Bosco – Mecanoplast.

- PET



Foto. 5.1 Botella de PET

- PVC rígido (transparente)



Foto. 5.2 Frasco de PVC

- PVC blando (negro)



Foto. 5.3 Moqueta de PVC

- PS cristal



Foto. 5.4 Porta CDs de PS cristal

- PS alto impacto



Foto. 5.5 Maceta de PS alto impacto

- PP



Foto. 5.6 Frisbee de PP

- PEAD – 2 muestras



Foto. 5.7 Cilindro de PEAD



Foto. 5.8 Soporte carrete de hilo de PEAD

- PEBD



Foto. 5.9 Ganchos de PEBD

- ABS



Foto. 5.10 Seguros para sunchos de ABS

A continuación se detallan las pruebas de laboratorio realizadas y sus respectivas mediciones. Cabe señalar que las técnicas de Identificación por laser y Rayos X no fueron realizadas, pero en su proceso son similares a la de espectroscopia infrarroja,

Así que los métodos que se pudieron comprobar en ensayos de laboratorio fueron el de hundimiento-flotación, flotación por espuma, fricción electrostática, espectrometría infrarroja, análisis térmico, ensayo a la llama, y el de luz polarizada.

5.1.1 HUNDIMIENTO-FLOTACION

Debido a que este método solo se fundamenta en la densidad del material a clasificar, es necesario primero utilizar un molino para obtener similares formas y tamaños de las muestras para que no interfieran variables como empuje o área de contacto con el fluido en el experimento; para lo cual se utilizó el molino de el laboratorio de resistencia de materiales.

El tamaño medio del plástico triturado debe ser entre 2 y 14mm³³, pero se recomienda que no pase de 10mm y a pesar de no existir normas relativas a este procedimiento, las normas ASTM especifican en todos sus ensayos para polímeros que el espesor de las muestras no debe ser mayor a 13mm. A continuación se presentan fotos del plástico triturado.



Foto. 5.11 PET triturado

³³ Un método y un aparato para separar material de desecho, Oficina española de patentes y marcas,



Foto. 5.12 PVC transparente triturado



Foto. 5.13 PVC negro triturado



Foto. 5.14 PS cristal triturado



Foto. 5.15 PS alto impacto triturado



Foto. 5.16 PP triturado



Foto. 5.17 PEAD triturado



Foto. 5.18 PEAD triturado



Foto. 5.19 PEBD triturado



Foto. 5.20 ABS triturado

Después de este primer paso, se utilizó agua (densidad=0.9678g/cc) como fluido de separación, además de alcohol etílico al 99% y cloruro de sodio (sal de mesa) como se dijo previamente en el capítulo 4.1.1 figura 4.2, con la diferencia que solo se utilizó un vaso de precipitación de 600 ml para determinar el grado de efectividad en que se separa el material.

Es preciso señalar que al no contar con equipos adecuados para la medición de densidades en los laboratorios del DECEM, se determinó dichos valores por medio de la masa y el volumen, lo que acarrea varios errores de precisión.

Con estas acotaciones, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5.1 Resultados de ensayo de flotación

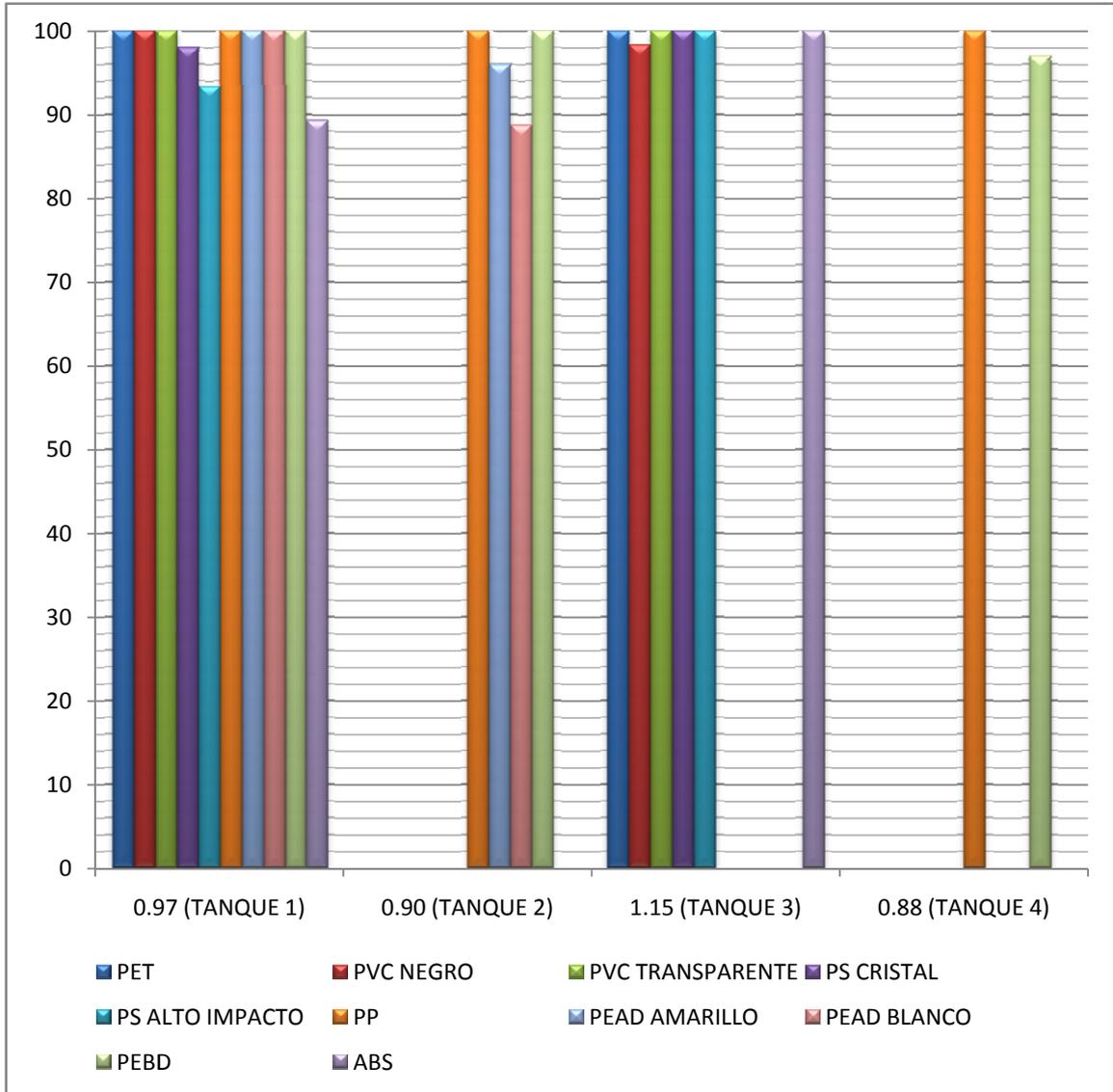
	PESO DE MUESTRA [g]	DENSIDAD [g/cm ³]			
		0.88(tanque 4)	0.90(tanque 2)	0.97(tanque 1)	1.15(tanque 3)
PET	5.50	—	—	Hunde 100%	Hunde 100%
PVC negro	41.45	—	—	Hunde 100%	Hunde 98.3%
PVC transp.	10.50	—	—	Hunde 100%	Hunde 100%
PS cristal	25.80	—	—	Hunde 98.0%	Flota 100%
PS alto imp.	33.10	—	—	Hunde 93.35%	Flota 100%
PP	18.65	Flota 100%	Flota 100%	Flota 100%	—
PEAD amarillo	12.40	—	Hunde 95.96%	Flota 100%	—
PEAD blanco	17.70	—	Hunde 88.7%	Flota 100%	—
PEBD	19.7	Hunde 96.95%	Flota 100%	Flota 100%	—
ABS	15.4	—	—	Hunde 89.28%	Flota 100%

Fuente: Propia

El procedimiento para encontrar estos porcentajes, fue primero obtener la densidad marcada en la referencia Fig. 4.2 y observar si los resultados eran los esperados. En vista de que esto no fue así, se modificaron las densidades de los fluidos de separación para obtener el comportamiento deseado. Además cuando se buscaba la densidad de 1.20 g/cm³, óptima según la referencia, se saturó la solución y solo se llegó a la densidad de 1.15 g/cm³, pero aun así se pudo obtener el comportamiento deseado de los polímeros.

En cada tanque existe diferente porcentaje de recuperación para los diferentes polímeros, a continuación se muestra un gráfico donde se visualiza mejor el porcentaje del comportamiento deseado para cada polímero en cada tanque:

Graf. 5.1 Porcentaje de comportamiento deseado de cada polímero/por tanque de separación



Fuente: Propia

Las densidades de operación fueron obtenidas añadiendo alcohol etílico o sal (NaCl) al agua con el fin de aproximarse a los valores de la figura 4.2, pero se vio en el experimento que las densidades tabuladas no cumplieron su objetivo para nuestro caso, llegando a los siguientes valores:

Tabla 5.2 Soluciones para la obtención de diferentes densidades

DENSIDAD [g/cm ³]	Agua [cm ³]	Alcohol [cm ³]	Sal [gr.]
0.88	300	340	--
0.90	300	290	--
0.97	500	--	--
1.15	500	--	157

Fuente: Propia

A continuación se muestran algunas fotos del ensayo:

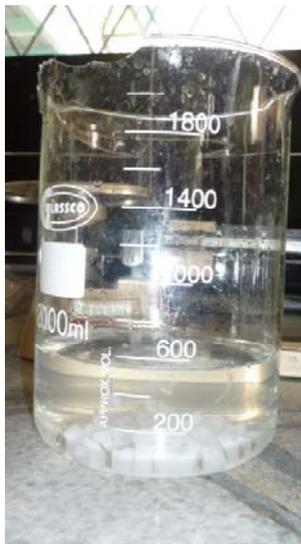


Foto 5.21 Hundimiento de ABS



Foto 5.22 Flotabilidad de PEBD



Foto 5.3 Hundimiento de PEAD amarillo



Foto 5.4 Hundimiento de PEAD blanco



Foto 5.25 Hundimiento PVC transparente



Foto 5.26 Hundimiento PET



Foto 5.27 Flotabilidad PP

Como resultado de este ensayo se puede decir que la media aritmética del porcentaje de comportamiento deseado es:

$$\bar{\varphi}_0 = \frac{\sum_i \varphi_i}{i} \quad 5.1$$
$$\bar{\varphi}_0 = 98.20\%$$

Se puede mejorar este procedimiento controlando de mejor manera el tamaño y forma de los elementos, así como realizando una limpieza previa de los elementos se puede eliminar variaciones indeseadas en las densidades.

Además se debe controlar constantemente la densidad del fluido de separación y removerlo constantemente para llegar al equilibrio según la norma ASTM D1505.- METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DENSIDAD DE PLASTICOS POR LA TECNICA DE GRADIENTE DE DENSIDAD, puesto que este hecho afecta en el tiempo de decantación de los elementos a separar y si en sumerge al material en el fluido para romper con la tensión superficial.

5.1.2 LUZ POLARIZADA

Para este ensayo es precisa la supervisión del operador, puesto que no es precisamente un método de separación automatizado, sino un método de ayuda para el operador en la separación de algunos elementos.

Se necesitó para este ensayo dos lentes polarizadores, los cuales fueron obtenidos del laboratorio de física, y una luz monocromática de mercurio, que también fue prestada por dicho laboratorio. El proceso consiste en girar el segundo polarizador para determinar con que ángulo el material afecta a la luz.

El esquema del equipo se muestra en foto siguiente:

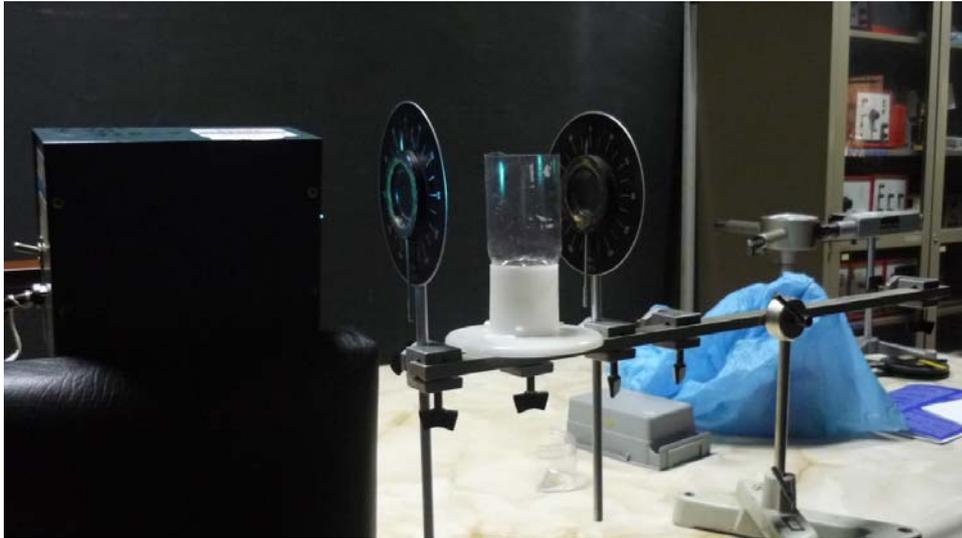


Foto 5.28 Disposición del equipo de luz polarizada



Foto 5.29 Visualización de luz a 0° a través de elementos transparentes

No existe una norma de referencia para este procedimiento, pero la única norma que se encontró en la que se relacionaban algunos de los elementos utilizados en este ensayo es la ASTM D4093 (Anexo B), la cual describe que la lámpara de monocromática debe ser uniforme y de al menos $0.3\text{W}/\text{in}^2$. Esta norma está dada para encontrar el índice de refracción, donde tiene importancia el material, variable que no se toma en cuenta en este ensayo.

Como se puede ver, el elemento a analizar tiene que estar completo, y de manera estable para poder definir el ángulo en el que se diferencia cada elemento, proceso que magnifica su eficiencia en un cuarto oscuro. Estos son los resultados del ensayo, tomando en cuenta que este método es posible con elementos translucidos

- Los polarizadores sin elementos a identificar la luz se oscurece totalmente a 20° .
- Con el PET en el medio de los polarizadores, la luz nunca se oscurece ni siquiera un poco, a pesar de que a 100° existe un cambio en el avistamiento de los esfuerzos del material.
- En el análisis del PVC la luz se oscurece totalmente a 20° , similar a cuando no hay ningún polímero.
- Analizando el PEBD existe mayor intensidad en cambio de esfuerzos a 97.5° , pero nunca se oscurece.
- Con el PP como elemento a analizar, no se ve ningún cambio.
- En el análisis de PEAD, es similar al PP, no existe cambio en la luz recibida por el operador.
- Por último, analizando el PS cristal se ve mayor intensidad en el cambio de esfuerzos visibles a 112° .

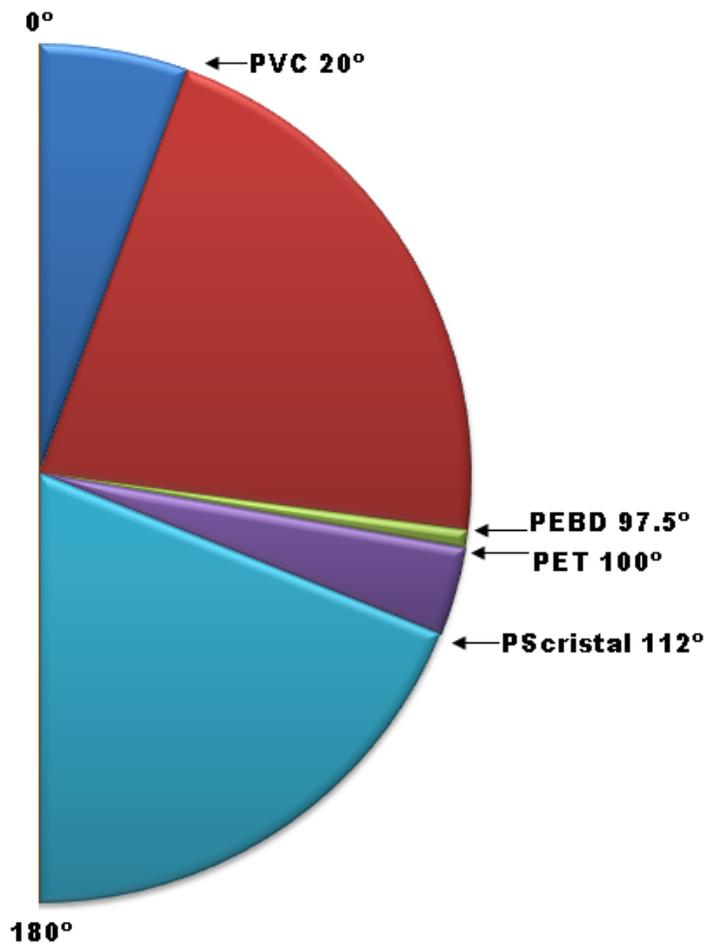


Figura 5.1 Ángulos de diferenciación de polímeros translucidos y transparentes³⁴

La Fig. 5.1 solo se muestra hasta los 180° debido a que a este ángulo los polarizadores vuelven a estar alineados y se puede ver toda la luz incidente.

³⁴ Fuente propia



Foto 5.30 Visualización de luz a 20° a través del PVC

Como se puede ver este método es óptimo únicamente para diferenciar el PET del PVC puesto que es el único material que cambia totalmente el ángulo de la luz incidente hasta obscurecerlo totalmente a 20° en el segundo polarizador. Con el resto de materiales se ve una pequeña diferencia pero no es relevante para identificar materiales.

5.1.3 FRICCIÓN ELECTROSTÁTICA

Como se pudo ver en el capítulo anterior este método tiene su mayor eficacia entre los materiales más distantes en la serie triboeléctrica, es decir es aplicable al máximo entre el PET y PVC, que justamente son los materiales complicados de clasificar por el método de densidades. Al ser un método de micro clasificación en primer lugar se requiere que el material sea triturado previamente y luego buscar un contenedor de alguno de los dos materiales implicados en el proceso, para lo cual se adquirió un tubo de PVC y una botella de PET.

Al no tener un equipo que pueda medir cuantitativamente el voltaje electrostático de superficie del elemento de plástico a separar, se verificó cualitativamente la carga entre dos elementos de naturaleza conocida de suficiente tamaño, con el fin

de demostrar que la carga de los elementos al frotar es realmente considerable para el experimento. Para este paso frotamos varias veces a los elementos entre si y los acercamos a un electroscopio, el cual nos da resultados cualitativos en la tabla 5.3:



Foto 5.31 Electroscopio, tubo PVC, botella PET



Foto 5.32 Electroscopio, botella PET, PVC negro triturado

Tabla 5.3 Combinaciones de PET-PVC cargados por fricción

COMBINACIONES	CARGA			
	Botella PET	Tubo PVC	PVC transparente	PVC negro
Botella PET – PVC negro	Mínima	--	--	Casi nula
Botella PET – PVC transparente	Máximo	--	Mínimo	--
Tubo PVC – Botella PET	Máximo	Máximo	--	--

Fuente: Propia

Tanto las pruebas de verificación como las siguientes serán disminuyendo la humedad y aumentando la temperatura para cada prueba a través de un secador de manos eléctrico que alcanza una temperatura de 50°C con una humedad de alrededor del 10%

Ya en cuanto a los resultados de verificación, como se pudo ver en las pruebas con el electroscopio la combinación de materiales que tiene más traspaso de electrones es el del tubo de PVC con la botella de PET, y en segundo lugar la combinación de la botella de PET y el PVC transparente, dejando a la combinación de la botella de PET con el PVC negro casi nula.

Cabe señalar que según se registro, los elementos se cargan con diferentes valores en una misma combinación, lo cual es imposible, pues por principio la cantidad de electrones que pierde un elemento lo gana el otro elemento, por lo que la explicación a este fenómeno es que ciertos elementos se descargan más rápido que otros, condición a tomar en cuenta para la implementación del método.

Ya que no se pudo calcular el voltaje para el campo eléctrico necesario según los elementos que tenemos, tomaremos la referencia del capítulo 4.1.7 de 240Kv/m.

El campo eléctrico por el que debe caer el plástico mixturado tiene como elementos principales dos tablas triplex de 30 cm por lado y paralelas, forradas con laminas de cobre de 0.3 mm de espesor, bajo el siguiente criterio

Según la ley de Ohm;

$$V = I * R \quad 5.2$$

La resistencia de un material está determinada por

$$R = \rho * \frac{l}{s} \quad 5.3^{35}$$

donde

ρ es la resistividad del material que para el cobre es $0.0171 \frac{\Omega * mm^2}{m}$

l es la longitud del conductor, y

s es la superficie transversal del conductor

Entonces tomando como modelo que las láminas están constituidas por finos alambres de superficie s , y la unidad como longitud se tiene que:

$$s = \frac{I * \rho * l}{V} \quad 5.4$$

Por lo cual se deduce que el espesor mínima de la placa es $1.71 \times 10^{-8} \text{ mm}^2$ espesor suficiente puesto que el amperaje es mínimo, y se utilizo una fuente de corriente continua de 10 Kv a 10mA.

Despues verificamos que realmente las placas hayan sido cargadas, puesto que en intentos previos con el generador de Van-der-graff y la bobina de Tesla no se pudo cargar las placas, o se descargaban muy rapidamente.

El campo uniforme se describe bajo la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta d} \quad 5.5^{36}$$

³⁵ Instalaciones eléctricas en media y baja tension, Jose Maria Trasancos

Donde E es la magnitud del campo magnético, V es la diferencia de potencial y d es la distancia entre las placas. De esta forma con una distancia de 4.5 cm se logra un campo de 222.2 Kv/m, próximo a los 240 Kv/m de referencia.



Foto 5.33 Fuente de corriente continua de 10Kv

³⁶ Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone, G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita

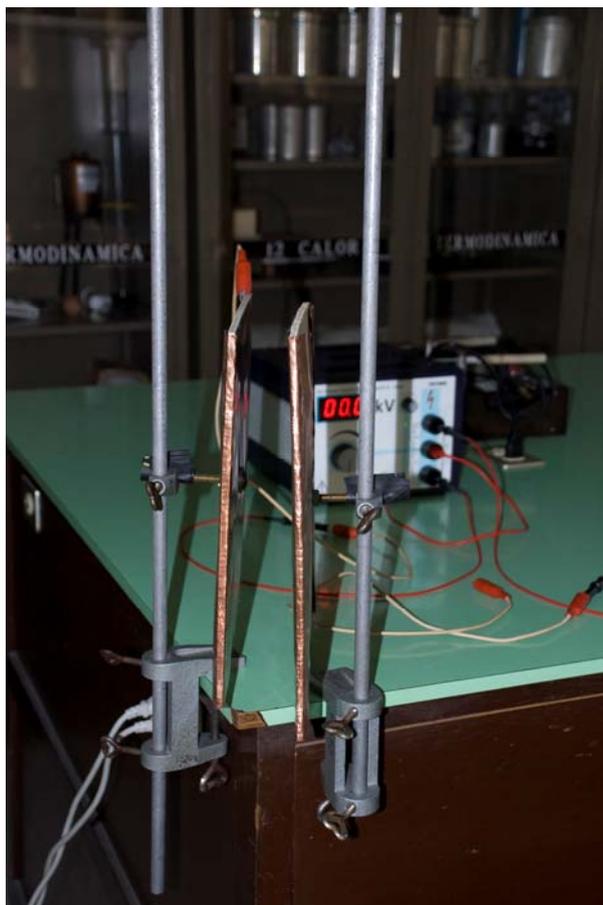


Foto 5.34 Equipo de prueba de separación mediante carga por rozamiento

De acuerdo con los resultados obtenidos en el electroscopio, la combinación que se empleara para la demostración de este método será la botella de PET y el PVC transparente triturados, que para que las pruebas sean consecuentes con el estudio y se pueda evaluar cada método, son los mismos utilizados en todos los métodos expuestos de microclasificación.

En vista de que la apariencia del PET y el PVC transparente es similar se marcan unos pocos elementos de PVC transparente y se agitan dentro del tubo de PVC junto con elementos triturados de PET para dejarlos caer libremente a través del campo magnético, procedimiento que no tuvo una buena respuesta puesto que los elementos eran muy pesados y la distancia entre placas muy pequeña para poder observar claramente el fenómeno.

Para que el experimento sea consistente se reduce el tamaño de los elementos tanto de PET como de PVC transparente, lo cual produce mayor superficie de contacto, y por lo tanto mayor posibilidad de transferencia de electrones, además de que se reduce el peso de cada elemento y tengan menos resistencia a la atracción que produce el campo magnético, ya que la fuerza de atracción es mínima, finalmente se hace un péndulo con un elemento de cada material con el fin de poder simular la caída de los elementos en cámara lenta, debido a que no se puede evidenciar una separación en caída libre por la mínima distancia entre placas.

En un inicio los péndulos fueron agitados conjuntamente en el tubo de PVC, con plástico mixturado de PVC y PET, pero el inconveniente suscitado fue que ambos péndulos se atraían entre sí por tener distintas polaridades, o con otros elementos como el recipiente mismo, descargándose al instante y resultando imposible la comprobación del principio. Para solucionar este problema se colocó el péndulo de PVC transparente en un recipiente de PET para agitarlo solamente con PET triturado, mientras que el péndulo de PET se colocó en un recipiente de PVC solo con PVC transparente triturado y expuesto cada péndulo de manera independiente.



Foto 5.35 Recipiente y elementos PET, péndulo PVC



Foto 5.36 Recipiente y elementos PVC, péndulo PET

Los resultados de este experimento fue lo esperado según la bibliografía pues el péndulo de PVC transparente es atraído por la placa que esta con carga positiva, mientras que la placa negativa atrae el péndulo de PET. Después de tener éxito con los péndulos expuestos de manera independiente al campo magnético, se lo registra fotográficamente exponiendo los dos péndulos al campo pero en planos diferentes para que no se atraigan entre sí.



Foto 5.37 Recipiente y elementos PVC, péndulo PET

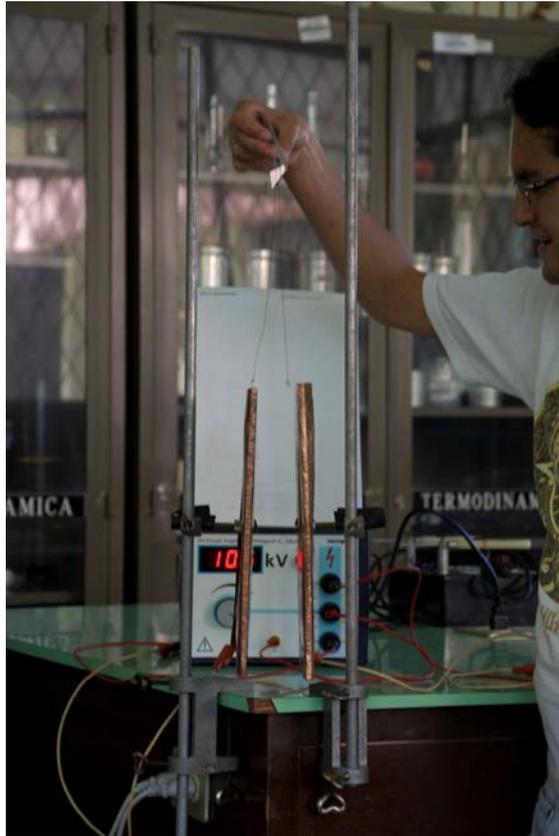


Foto 5.38 Péndulos de PVC y PET separados por el campo magnético

Cabe señalar que los péndulos de prueba, y por lo tanto los elementos a separar cuando se implemente el método nunca tienen que tocar las placas, pues debido a que por su mecanismo de carga y el tamaño del elemento la carga es mínima, por lo que al tener contacto con estas los elementos se descargan, y se cargan automáticamente con la polaridad de la placa tocada, siendo repelidos hacia la placa contraria invalidando el método, y si llega a alcanzar la placa contraria se producirá el mismo efecto y el elemento tendrá la tendencia de rebotar de placa a placa constantemente. Para evitar al máximo este efecto se recomienda colocar las placas inclinadas de forma que la atracción del campo magnético sea máxima al inicio de la caída del elemento, y que vaya disminuyendo al caer, y de esta manera el elemento nunca tocará la placa.

Como se dijo en el capítulo anterior este método de separación tiene en el clima a dos variables importantes y que pueden afectar su eficacia. Entonces a pesar de

haber realizado las pruebas con un clima de T=19C y una H=35%, el plástico mixturado así como los contenedores fueron secados en un secador de manos constantemente, por lo cual no se tomo en cuenta estas variables climáticas.

5.1.4 FLOTACION POR ESPUMA

Este procedimiento solo se aplicara a la separación del PET y el PVC ya que este no pudo ser separado por el método de flotación-hundimiento. Y de nuevo para ser consecuente con el estudio se utilizo el mismo plástico mixturado empleado en la demostración de los otros métodos.

En vista de que no existen normas para este procedimiento, se observo especificaciones puntuales de normas que tienen algún parecido en procedimiento o elemento. Así se encontró que la norma ASTM D792 referente a METODO DE PRUEBA STANDARD PARA LA DETERMINACION DE DENSIDADES DE PLASTICOS POR DESPLAZAMIENTO, recomienda que el fluido de separación deba tener 23°C, semejante a la temperatura ambiente.

Según la bibliografía para el éxito de este método se utiliza el PVP como humectante, el cual se disuelve en el agua y se adhiere a la superficie de los elementos de PVC con mayor facilidad que a la superficie de los elementos de PET. Se pudo conseguir 150g de PVP de los laboratorios LIFE.

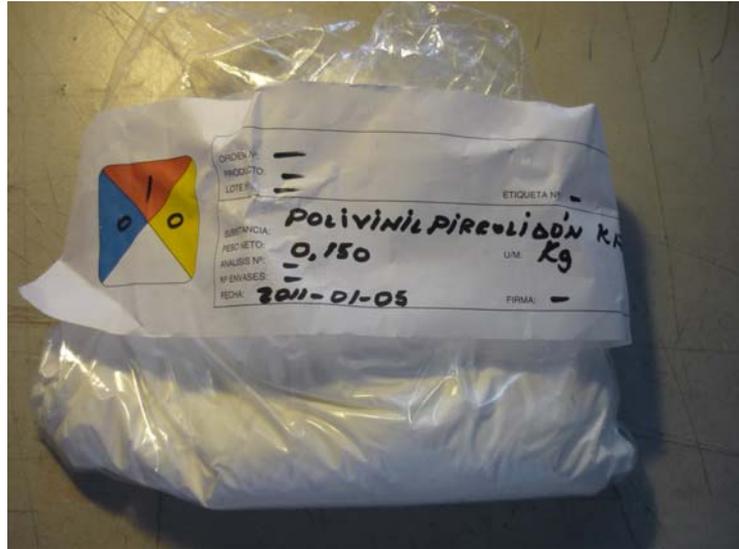


Foto 5.39 150g de PVP donados por laboratorios LIFE

El otro reactivo importante en este método según la referencia es el MIBC, que funciona como espumante, pero debido a su alto costo y tomando en cuenta que solo se necesitan pequeñas cantidades para el experimento, no era justificable su compra, pero se consiguió la donación del Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Facultad de Minas y Petróleos de la Universidad Central del Ecuador de pequeñas cantidades de otros espumantes comúnmente utilizados en la minería como ACEITE DE PINO, FLOTOL B y DOWFROTH 250. Con estos espumantes se busca llegar a un valor de tensión superficial menor a 50kN/m .³⁷

La celda de flotación fue armada con una bomba de aire utilizada en las peceras domesticas y un recipiente transparente con capacidad para 1lt.

³⁷ Un método y un aparato para separar material de desecho, Oficina española de patentes y marcas



Foto 5.40 Celda de flotación

La primera prueba se la realizo entre el PVC negro y el PET, reduciendo el tamaño de los elementos para que tengan un promedio de 0.03g a 0.04g por cada elemento, y así reduciendo el peso al máximo para que puedan ser fácilmente elevadas por la burbujas de aire, además de disminuir la superficie de sustentación para que no influya en los resultados, después se colocan 3.00g de cada material al fondo de la celda de flotación sobre una cesta, con el suministro de aire bajo esta, se le administra 0.1g de PVP, y se deja diluir sin mezclar, completándose este proceso en 7 minutos. Se coloca 8 gotas de DF 250, y se suministra aire desde bajo la cesta sin ninguna agitación durante 3 minutos, dando como resultado el hundimiento de todo el material de PVC negro y dejando flotar 2.00g de PET que se considera como material recuperado.

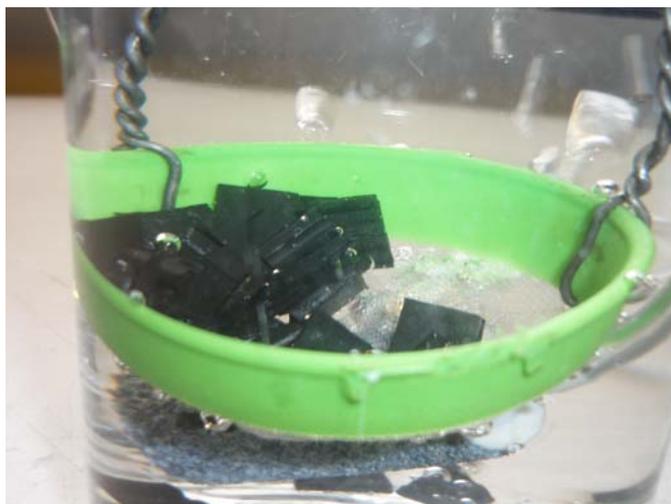


Foto 5.41 PVC negro y PET en cesta de la celda de flotación

Después de retirar el PET recuperado en la primera etapa se coloca nuevamente en la cesta el material que se hundió, y añade 3 gotas de DF 250 para luego suministrar aire igual que la primera vez. De esta segunda etapa se logran recuperar 0.26g mas de PET, hundiéndose todo el PVC negro.



Foto 5.42 Separación entre PVC negro y PET

Se prueba una tercera etapa del procedimiento, en donde se recoge el material hundido en la cesta y se añaden 3 gotas más de DF 250, y de igual manera se suministra aire recuperando 0.21g más de PET. De aquí en adelante no es recomendable continuar con el proceso, porque en una cuarta y quinta etapa, bajo las mismas condiciones de adición de DF 250 y de suministro de aire solo se recupero 0.02g de PET en cada intento.



Foto 5.43 Flotabilidad en espuma de PET

Se probó incrementando la cantidad de espumante pero no varió los resultados previos, a pesar de que existían elementos de PET mucho más livianos que los ya recuperados.

Esta fase del experimento se puede resumir en la siguiente tabla:

Tabla 5.4 Separación por espuma de PET y PVC negro en función del espumante

Constantes: Peso/material=3.00g, Tamaño/elementos, PVP=0.1g

MATERIAL SEPARADO	DOWFROTH 250 (gotas)				
	8	11	14	17	20
PET (gramos)	2.00	2.26	2.47	2.49	2.51
Pureza de PVC negro(%)	75	80.21	84.98	85.47	85.95

Fuente: Propia

En estos ensayos se evidencia que el PVC negro se hunde en su totalidad, pero nunca se separa completamente del PET, motivo por el cual solo se tabula su pureza, mientras que el PET tiene siempre una pureza del 100% pero no flota en su totalidad. Además es importante señalar que la medición de los elementos recuperados solo se realizó una vez cerrado el flujo de aire.

El siguiente paso del experimento fue probar si el proceso funciona entre el PVC transparente y el PET, para lo cual se colocó en la cesta de la celda de flotación 3.00g de solo elementos de PVC transparente, y se añadió 0.1g de PVP con 8 gotas de DF 250, igual al proceso anterior, y no se obtuvieron resultados satisfactorios puesto que solo se hundió el 0.50g del PVC. Ante este resultado que contradice con la referencia bibliográfica se añadió 0.1g de PVP más a la solución sin mayor resultado, después al añadir 0.2g más de PVP a la solución se hundió solamente 0.8g, y después de añadir 0.5g más de PVP, llegando a casi 1.00g, solo se logró hundir 1.30g de PVC transparente, pero al utilizar las mismas cantidades y removiendo por 10 minutos se hundió cerca de 2.52g de PVC. Aun con este resultado el proceso es extremadamente insatisfactorio y contradictorio a la bibliografía, puesto que no existe un patrón definido, y al añadir pocos elementos de PET y removerlos, estos también caen al fondo de la celda de flotación.

La última opción para verificar si este método de separación tiene validez se intentó simular al máximo la forma en que se procede en la minería, donde los minerales son extremadamente pequeños y se agitan constantemente a altas velocidades para que se distribuyan de mejor manera las burbujas. Con este fin se redujo los elementos a separar a la mitad, teniendo un promedio de 0.01-0.02 gramos por elemento.

Una vez reducidos los elementos a separar, se colocó en el fondo de la celda de flotación, es decir sin la cesta, 3.00g de PVC transparente. Se colocó 0.03g de PVP que se diluye completamente en 3 minutos y se deja acondicionar 2 más,

después del acondicionamiento se enciende el suministro de aire y se agita la celda de flotación a 1200rpm, mientras se le añade 6 gotas de DF 250.

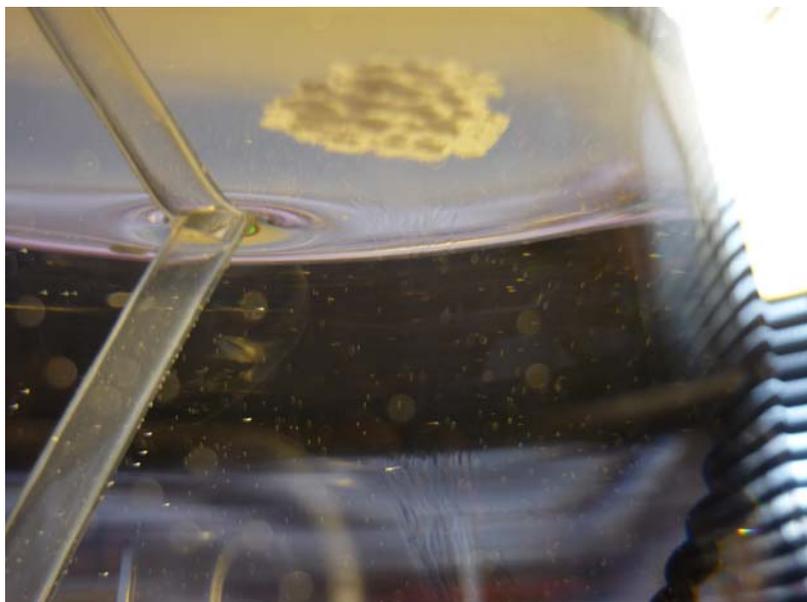


Foto 5.44 Afinidad del PVP al agua

Al final de este proceso da como resultado que el PVC transparente a pesar de haber atraído burbujas de aire (como se ve en la figura) se queda en el fondo 1.90g, lo cual es desde ya un mejor resultado que los anteriores.



Foto 5.45 Burbujas adheridas al PVC transparente

Como lo que se busca es que los elementos de PVC transparente se hundan en mayor cantidad, se repite el proceso anterior, pero en este caso en lugar de 0.03g de PVP se añade 0.04g, los cuales se disuelven en tiempo similar y se deja 7 minutos más para acondicionamiento, luego se suministra aire y se agita a la misma ultima velocidad, mientras se agrega solamente 3 gotas de DF 250. El resultado de este proceso fue que 2.52g de PVC transparente se quedaron en el fondo de la celda.

Tabla 5.5 Separación por espuma PVC trasparente en función de PVP, espumante y tiempo de acondicionamiento

Constantes: Peso/material=3.00g, Agitador=1200rpm, suministro de aire

PVP (gramos)	DOWFROTH 250 (gotas)	
	3	6
	MATERIAL DE PVC RECUPERADO (gramos)	
0.03 (5 min)	--	1.90
0.04 (10 min)	2.52	--

Fuente: Propia

En vista de que el proceso bajo las ultimas condiciones tuvo una eficacia del 84%, se repite el proceso exactamente igual, pero esta vez con elementos de PET, para comprobar si en realidad no se hunden como el PVC transparente. El resultado fue que 2.15g de PET flotaron arrojando una eficacia del 71.67%. Como observación adicional se encontró que las burbujas de aire al final del proceso tanto el PET como el PVC transparente que se queda en fondo atrae burbujas de aire de manera similar, pero a pesar de esto se evidencio una marcada separación.

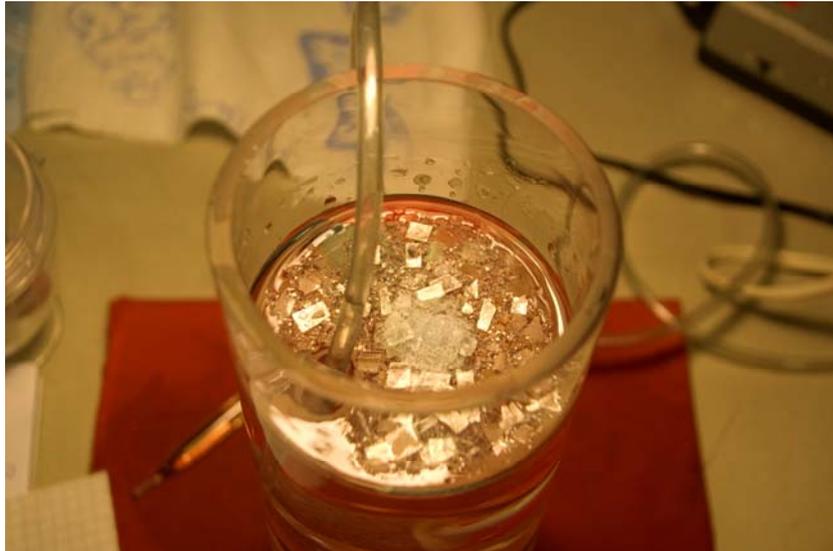


Foto 5.46 Flotabilidad de PET

Por último, y llevando al ensayo más cerca de las condiciones utilizadas en la minería, se tritura al máximo los elementos a separar, dejando a los elementos casi en su totalidad del tamaño de granos de arena. Entonces con los dos tipos de material se repiten las condiciones del último ensayo, es decir 3.02g de material, 0.04g de PVP, agitación constante a 1200 rpm y 3 gotas de DF 250, dando como resultado que el PVC transparente se hundió 2.33g logrando una eficacia de 77.67%, mientras que PET floto en 1.94g reduciendo su eficacia a un 64.67%.

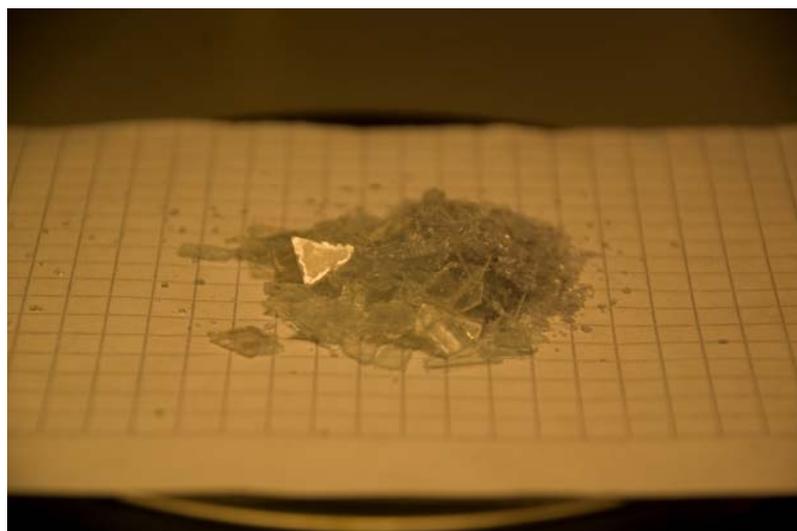


Foto 5.47 Material triturado al máximo



Foto 5.48 Celda de flotación con agitación constante

Estas mediciones de masa se realizaron después de que los elementos del material hayan sido secados para no verse afectados por el peso del agua.

Tabla 5.6 Separación por espuma PVC y PET transparente en función del tamaño del elemento

Constantes: Peso/material=3.00g, Agitador=1200rpm, suministro de aire, PVP, espumante, tiempo de acondicionamiento

TAMAÑO DEL MATERIAL	MATERIAL (gramos)			
	PET	%Eficacia PET	PVC Transp.	%Eficacia PVC Transp.
Cortado en pequeños elementos	2.15	71.67	2.52	84.00
Completamente triturado	1.94	64.67	2.33	77.67

Fuente: Propia

Como se puede ver, en los experimentos de este procedimiento de separación de polímeros existen muchas variables a tomar en cuenta, como son las cantidades de cada reactivo, el tiempo de acondicionamiento, el tamaño de los elementos a separar, la velocidad de agitación y el suministro de aire. Además se pudo observar que es conveniente retirar el polímero de la celda de flotación mientras se agita, es decir que se separan los polímeros retirando la espuma generada. Por último al igual que cuando se realiza este procedimiento en la industria minera, la pureza del material separado nunca alcanza el 100%.

5.1.5 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

Esta prueba fue realizada en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), del Departamento de Ciencia de los Alimentos y Biotecnología, de la Escuela Politécnica Nacional.

Debido al alto costo del ensayo solo se optó por analizar las muestras de los materiales que más se fabrican según Mecanoplast. Así los elementos analizados fueron PS alto impacto (Maceta), PEAD (Base para carrete de hilo), PP (Frisbee), PEBD (Gancho), PET (Botella) y el PVC transparente (Frasco de gel), este último se escogió en lugar de PVC negro por su similitud óptica con el PET.

Para este procedimiento solo se necesita una pequeña y delgada muestra del material y se utilizó un Espectrofotómetro FT-IR Perkin Elmer Spectrum One en un rango de 4000 a 450 cm^{-1} .



Foto 5.49 Espectrofotómetro FT-IR Perkin Elmer Spectrum One

En este trabajo se pudo ver que los espectros que se dieron en la referencia no son necesariamente iguales a los de las pruebas de laboratorio, debido a que la bibliografía utiliza un rango de longitud de onda desde 1200 a 1800nm, mientras que el ensayo trabaja con un rango de 2500 a 22200 nm, calculado bajo la siguiente formula;

$$\lambda_{nm}ensayo = \frac{1 \cdot 10^7}{\lambda_{cm}referencia}$$

Los valores de 2500 a 22200 nos indican que el ensayo fue realizado en el rango del infrarrojo intermedio. Este aspecto es innato en las características propias de cada equipo. Pero se pudo comprobar que las composiciones de las muestras eran las que se conocía previamente.

Los resultados de los análisis se pueden ver en el Anexo A.

5.1.6 ANALISIS TERMICO

Al igual que en el ensayo anterior, este procedimiento se verifico en los laboratorios del CIAP, con las mismas muestras de la espectroscopia infrarroja y el equipo utilizado fue un calorímetro diferencial de barrido NETZSCH DSC 204 F1

Phoenix bajo la norma ASTM D 3418, en atmosfera de nitrógeno con un flujo de gas de 20ml/min y un incremento de temperatura de 10°C/min.



Foto 5.50 Calorímetro diferencial de barrido NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix

Los resultados de estas pruebas se pueden ver en el Anexo A.

Este método no es aplicable para el PVC porque se degrada a aproximadamente 70°C lo cual hace difícil su medición puesto que sus características varían aleatoriamente. La norma para determinar la estabilidad térmica del PVC se encuentra en la ASTM D2115.

5.1.7 PRUEBA DE ENSAYO A LA LLAMA

Este método a pesar de que no es aplicable en la automatización de la clasificación de polímeros, que fue el objetivo inicial, es de los más básicos y es evidentemente funcional cuando se conoce que todo un grupo de plásticos es del mismo material.

A pesar de ser un mecanismo básico de identificación, no existe una norma que regularice este procedimiento, al parecer porque los resultados arrojados son una

característica cualitativa de los polímeros y muy frecuentemente relativos al operario.

Bajo esta condición, y con la finalidad de que el ensayo sea sustentado técnicamente se recurrió a las normas de la ASTM que enuncian la quema de polímeros, para recoger especificaciones puntuales adaptables a nuestro requerimiento. Encontrando las siguientes

- ASTM D635.- METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA TASA Y TIEMPO DE COMBUSTION DE PLASTICOS EN POSICION HORIZONTAL.
- ASTM D3801.- METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA MEDICION COMPARATIVA DE LA CARACTERISTICAS DE PLASTICOS SOLIDOS A LA LLAMA EN POSICION VERTICAL
- ASTM D5048.- MEDICION COMPRATIVA DE LAS CARACTERISTICAS Y RESISTENCIA DE PLASTICOS SOLIDOS USANDO UNA LLAMA DE 125 mm

Después de analizar estas normas (Anexo B) se determino el siguiente procedimiento,

La muestra no es pre acondicionada, pero se recomienda que tenga como mínimo 30mm de ancho,

Las muestras no deben ser mayores de 13mm de espesor (ASTM D635, D3801)

Se requiere que el ambiente este entre 15°C a 35°C con una humedad entre el 45% y el 75% (ASTM D635, D5048, D3801)

La llama será de GLP (propano/butano) a 65PSI con una Poder Calorico Superior de 117.23 MJ/m³

El la llama será de aproximadamente 125mm, de color azul completamente, esperando 5 minutos para que se establezca la llama antes de realizar cualquier ensayo (ASTM D635, D5048)

La llama estará expuesta a 45° (ASTM D635)

Colocar bajo la punta de la llama a una distancia de 300mm algodón con un máximo de 6mm de espesor, para observar si se enciende el algodón, en caso de que el polímero gotee.

La muestra debe ser acercada en posición horizontal, formando un ángulo de 45° entre el plano longitudinal de la muestra y el eje vertical (ASTM D635).

La muestra debe hacer contacto con el extremo de la llama avanzar a una tasa uniforme y similar a la tasa con la que se consume el polímero. (ASTM D635)

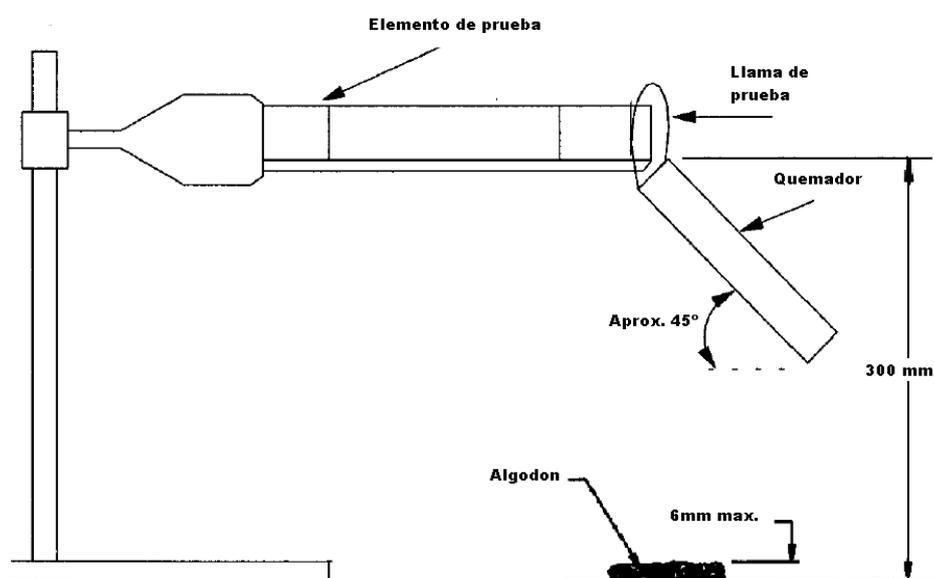


Figura 5.2 Esquema de equipo para combustión de plásticos-Vista frontal

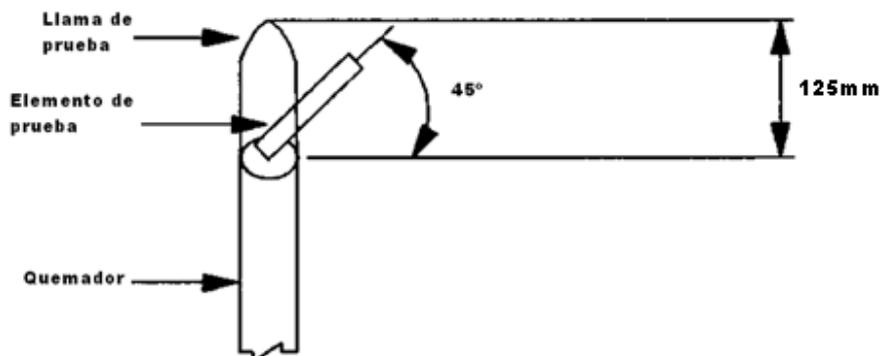


Figura 5.3 Esquema de equipo para combustión de plásticos-Vista lateral

Las normas ASTM son operadas con metano como suministro del mechero, el cual tiene un PCS de aproximadamente 37.4^{38} MJ/m³ mientras que en nuestra procedimiento empleamos el GLP con un PCS de 99.05 MJ/m³, el cual esta valorado similar al propano³⁹, y una temperatura de llama de $1980^{\circ}\text{C}^{40}$

En sí, el ensayo es simple pues solo se expuso a la llama, bajo las anteriores indicaciones a los polímeros, que nuevamente son procedentes de las mismas muestras utilizadas en todos los procesos anteriores, y anotar las propiedades que presentan sus combustiones ante los sentidos como el olfato, la visión y el oído.

Aquí se muestra un registro fotográfico de la reacción de los polímeros a la llama

- **PVC negro:**



Foto 5.51 Ensayo a la llama PVC negro-llama verde

³⁸ A Guide to Safe Material and Chemical Handling, Nicholas P. Cheremisinoff, Anton R. Davletshin

³⁹ GREET Transportation Fuel Cycle Analysis Model, GREET 1.8b, developed by Argonne National Laboratory; Perry's Chemical Engineers' Handbook, Perry, R.H. and Green, D.

⁴⁰ Hoja de datos para GLP INDURA - NCh 2245 Of.03



Foto 5.52 Ensayo a la llama PVC negro-se carboniza

- **PVC transparente:**



Foto 5.53 Ensayo a la llama PVC transparente-produce hollín

- **PEBD:**



Foto 5.54 Ensayo a la llama PEBD-llama azul

- **PEAD amarillo:**



Foto 5.55 Ensayo a la llama PEAD amarillo-llama azul y produce goteo

- **PEAD blanco:**



Foto 5.56 Ensayo a la llama PEAD blanco-llama azul



Foto 5.57 Ensayo a la llama PEAD blanco-translucido al fundirse

- **PP:**



Foto 5.58 Ensayo a la llama PP-llama azul

- **PS cristal:**



Foto 5.59 Ensayo a la llama PS cristal-llama amarilla



Foto 5.60 Ensayo a la llama PS cristal-se carboniza

- **PS alto impacto:**



Foto 5.61 Ensayo a la llama PS alto impacto-llama amarilla, poco hollín

- **PET:**



Foto 5.62 Ensayo a la llama PET-llama amarilla

Los resultados obtenidos a primera vista son:

- PS alto impacto: tiene una llama grande amarilla, y no se apaga fuera de la llama, lo que nos indica que es el mas combustible. Se enrrolla y produce burbujas
- PS cristal: Se encoje pero no se enrrolla, gotea y prende el algodón al instante. Llama grande y amarilla, y no se apaga fuera de la llama.
- PVC negro: La llama amarilla mediana nos indica que no se combustiona fácilmente, tiene el filo de unión con el material de color verde, produce mucho hollin y se apaga enseguida de separarlo de la llama, no gotea con facilidad, pero con el tiempo lo hace y prende el algodón que esta debajo
- PVC transparente: La llama es mediana y de color amarillo, produciendo mucho hollin. Produce un burbujeo en la superficie del material

- PEAD amarillo: La muestra gotea con facilidad, prendiendo el algodón que esta a 300 mm del punto de unión, la llama es pequeña y amarilla con el filo de unión azul, el material no se apaga y se vuelve translucido el borde de contacto con el elemento. Produce poco humo y no se carboniza
- PEAD blanco: Gotea con facilidad y produce una llama amarilla pequeña, no se evidencia humo y no se carboniza. Se transparenta con el calor pero vuelve a su color original nuevamente, al igual que el PEAD.
- PP: El filo de la llama amarilla de medio tamaño es azul en el borde de combustión, no se apaga y gotea fácilmente prendiendo el algodón de referencia, no se carboniza y no se evidencia mucho humo.
- PET: Se encoge con el calor, y tiene una llama amarilla y pequeña con raíz azul, no gotea con facilidad y se apaga al instante de separarlo de la llama. Además produce burbujas en su superficie.

A continuación se presenta una tabla descriptiva de lo observado, con variaciones de la tabla descrita en la bibliografía:

Tabla 5.7 Resumen del comportamiento de los polímeros a la llama

POLIMERO	CARACTERISTICA DE LA LLAMA Y COMPORTAMIENTO	OLOR
PVC negro	Llama amarilla con vértice verde, auto extingible, produce hollín, se ablanda, se carboniza	Cloro
PVC transp.	Llama amarilla con vértice verde, auto extingible, produce hollín, se ablanda, se carboniza	Cloro (menos intenso que el PVC negro)
PEBD	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante, produce poco hollín, produce goteo	Cera
PEAD amarillo	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante, produce hollín solo al inicio antes de prenderse, incoloro al fundirse, produce goteo	Cera
PEAD blanco	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante, produce hollín solo al inicio antes de prenderse, incoloro al fundirse (pero cuando se enfría retoma su color original), produce goteo	Cera
PP	Llama azul con vértice amarillo, llama brillante, produce hollín solo al inicio antes de prenderse, produce goteo	En un inicio huele a gasolina, y después deja un olor a cera
PS cristal	Llama amarilla, produce ruido al quemarse como pequeñas burbujas que se pueden ver, produce hollín, produce goteo, fácilmente inflamable, se ablanda, se carboniza	Un olor un poco más dulce que la cera.

**Tabla 5.7 Resumen del comportamiento de los polímeros a la llama
(Continuación)**

POLIMERO	CARACTERISTICA DE LA LLAMA Y COMPORTAMIENTO	OLOR
PS alto imp.	Llama amarilla, ruido casi imperceptible al quemarse pero se pueden ver pequeñas burbujas, produce hollín, produce goteo, fácilmente inflamable, se ablanda, se carboniza	Un olor un poco más dulce que la cera.
PET	Llama amarilla, se contrae al quemarse, produce goteo y esas gotas caen prendidas, se ven pocas burbujas, se carboniza, produce hollín.	Similar al vapor
ABS	No se carboniza pero si se oscurece, no gotea, llama amarilla con pequeño borde azul, se ablanda, produce mucho hollín	Similar al PS

Fuente: Propia

Es importante tener en cuenta que este método es perjudicial para la salud humana y para el medio ambiente, debido a los gases emitidos por la combustión de los plásticos, siendo el PVC el más dañino para ambos por la emanación de cloro en gran cantidad.

5.2 ANALISIS DE RESULTADOS APLICABLES A LA INDUSTRIA

Según los resultados obtenidos mediante el estudio sistemático de cada uno de los métodos propuestos y los ensayos de laboratorio realizados, se llega a la conclusión de que el mejor procedimiento para separar materiales por eficacia es el método de espectroscopia infrarroja, aunque pueden ser también rayos X y espectrometría Raman, ya que su principio analiza la naturaleza orgánica del material. Pero a pesar de esto se puede ver que en las industrias dedicadas al reciclaje a nivel mundial utilizan varios métodos de clasificación conjuntos con el fin de reducir al mínimo los errores y limitaciones técnicas de cada método, es así que para el caso de un empresa de mediano tamaño que surge en Ecuador se recomienda el análisis por espectroscopia infrarroja como primera opción, y después analizar los materiales por densidades como método que asegure la buena clasificación del material. Además se puede establecer como paso previo el método de luz polarizada.

A mi parecer y según lo expuesto, el resto de métodos son aplicables en bajas cantidades de reciclaje que necesitan de un sistema de control bastante estricto en algunos casos, ó que no representan una buena eficacia si se lo relaciona con el costo de su implementación.

Este es el caso el método de flotación por espuma, pues nunca recupera los materiales con el 100% de pureza, y el control de las cantidades exactas para llegar a una combinación perfecta entre humectante y espumante lo hace sumamente complejo. Caso similar ocurre con el método de fricción electrostática puesto que la certeza de que tanta fricción recibió o no un elemento es incierto, por lo que no se puede garantizar la pureza del material.

De igual, como se ha dicho anteriormente, forma el método de exposición a la llama solo tiene validez cuando se conoce de ante mano que todo el grupo del que proviene esa muestra es del mismo material, pero aun así no es recomendable su utilización porque los gases emanados por los polímeros al combustionarse pueden ser altamente tóxicos para el hombre y el medio ambiente, siendo el más dañino el PVC por su emanación de cloro.

Por último existen métodos que según las referencia son muy costosos para la industria, según la misma bibliografía, como es el caso de el método de disolución selectiva y devolitizacion por destello, o también otros métodos que no son aplicables a la industria como el análisis térmico, que por su naturaleza este método funciona solo con pequeñas muestras.

De los tres métodos recomendados al inicio de esta sección (espectroscopia infrarroja, hundimiento-flotación, y luz polarizada) para que trabajen en forma conjunta, el único del cual se pueden adquirir maquinas especializadas para su correcto funcionamiento es de espectroscopia infrarroja, puesto que la separación por densidades es en cierta medida un método artesanal, y no existen maquinaria que utilice la luz polarizada, razón por la cual estos dos procedimientos se implementarían de acuerdo a las realidades de cada empresa. Por esta razón

empresas a nivel mundial fabrican y venden maquinaria que efectúan todo el trabajo.

A continuación unos ejemplos de estas empresas:

- PELLENC SELECTIVE TECHNOLOGIES, Francia
- SHANGHAI MST OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY, Shanghai
- RTT STEINERT, Alemania

- Y solamente en Estados Unidos:

Manufacturers		
Company Name	Contact Person	Phone Number
Magnetic Separation Systems, Inc. (MSS)	Felix Hottenstein	615-781-2669
National Recovery Technologies, Inc. (NRT)	John Thomson	615-734-6400
Polymer Recovery Systems, Inc. (PRSI)	John Ayers	715-835-3233
Satake USA Inc.	Peter Cawthorne	281-276-3600

CAPITULO 6

ANALISIS ECONOMICO-FINANCIERO

6.1 COSTOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS COMO PRUEBAS DE LABORATORIO

A continuación se detallan los costos de los ensayos realizados como pruebas de laboratorio:

Tabla 6.1 Costo de las pruebas realizadas

METODO	EQUIPOS /ELEMENTOS UTILIZADOS	CANTIDAD	COSTO
Hundimiento- Flotación	Cloruro de Sodio-NaCl (Sal de mesa)	500g	\$0.70
	Alcohol Etílico	1 galón	Donación Mecanoplast
	Agua	--	Suministro publico
	Balanza análoga	1	Laboratorio de Física- ESPE
Luz polarizada	Luz de sodio monocromática	1	Laboratorio de Física- ESPE
	Polarizadores	2	Laboratorio de Física- ESPE
Fricción electrostática	Placas de triplex forradas con lamina de cobre	2	\$45.00
	Tubo de PVC	1	\$7.00
	Fuente de DC de 10Kv	1	Laboratorio de Física- ESPE
	Electroscopio	1	Laboratorio de Física- ESPE
Flotación por espuma	PVP (humectante)	150g	Donación laboratorios LIFE
	Dowfroth 250 (espumante)	300cc	Donación Facultad de Minas y Petróleos-UC
	Suministro de Aire	1	\$11.00
	Celda de flotación/cesta	1/1	\$5.50
Espectroscopia infrarroja	Servicio CIAP-EPN	1	\$235.20
Análisis Térmico	Servicio CIAP-EPN	1	\$369.60
Ensayo a la llama	--	--	--

Como se puede ver gracias a la colaboración de varias empresas y personas se pudo reducir los costos para las pruebas de laboratorio, teniendo un gasto total de tan solo \$674.00.

6.2 Determinación del método más económico aplicable a la industria con buenos resultados planteados

Los métodos que se detallaran en su costo de implementación para la industria son el método de hundimiento flotación, flotación por espuma, fricción electrostática, espectroscopia infrarroja y luz polarizada, con la salvedad de que por el alcance del proyecto no se describirá los elementos secundarios que complementan la clasificación de polímeros como eyectores o cintas de transportación, y que algunos elementos no se pudo obtener valores a pesar de la exhaustiva investigación, a estos componentes del sistema se le asignara un constante de U\$D 10000 para los métodos de macroclasificación y 15000 para los proyectos de microclasificación por la necesidad de un molino previo.

Además se conoce que el plástico reciclado triturado tiene un valor de U\$D 0.30 el kilo, en elementos sin pretratamiento, lo que nos da un ingreso anual de U\$D 78000. mientras que el plástico reciclado triturado tiene un precio de U\$D 0.55, teniendo un ingreso anual de U\$D 143000.

También cabe señalar que los equipos se depreciaran a 10 años y que los insumos y gastos indirectos de los procesos serán estimados de acuerdo al método. Además la inflación es del 4.23% con un riesgo país del 7.93 en mayo del 2011, y se espera que cada año incremente el ingreso en U\$D 2000

Así tenemos que:

Tabla 6.2 Costo de implementación de el procedimiento de hundimiento-flotación

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Tanques de separación con capacidad de 5m ³	4	\$5000	\$20000
Balanza electrónica 150Kg	1	\$800	\$800
Accesorios	-	\$15000	\$15000
TOTAL			\$35800

Entonces la inversión inicial será de U\$D 35800, y sus insumos mensuales se estima de U\$D 6207 por 8m³ de alcohol etílico, U\$D 320 por 6.28Kg de cloruro de sodio y U\$D 1000 por luz y agua, aparte del salario de 2 operadores de U\$D 264 cada uno.

En 10 años tenemos

TIR	30%
------------	------------

VAN	19080,7
------------	----------------

B/C	1,61
------------	-------------

Tiempo recupe.	5años
-----------------------	--------------

Tabla 6.3 Costo de implementación de el procedimiento de flotación por espuma para separación de PET y PVC

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Celda de flotación con capacidad de 5m ³ y agitador	1	\$6000	\$6000
Balanza electrónica 5Kg	1	\$60	\$80
Suministro de aire (compresor)	1	\$550	\$550
Accesorios	-	\$15000	\$15000
TOTAL			\$21630

En este caso los insumos serán el espumante en una cantidad mensual de 8 litros a U\$D 560, el humectante en una cantidad de 1200gr a U\$D 600, U\$D1000 por aire y agua, un operador de U\$D264 mensuales además de U\$D150 de mantenimiento. Con una inversión inicial de U\$D21630. En este caso, ya que el método separa únicamente el PET del PVC, y por sus consecuencias al medio ambiente el PVC cada vez es menos utilizado, su demanda y por lo tanto los ingresos bajarían a la mitad.

Tenemos que para 10 años:

TIR	21%
------------	------------

VAN	6092,9
------------	---------------

B/C	1,37
------------	-------------

Tiempo recupe.	3años
-----------------------	--------------

Tabla 6.4 Costo de implementación de el procedimiento de fricción electrostática para separación de PET y PVC

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Placas de cobre de 1x2m	2	\$240	\$480
Motor para remover el material	1	\$3500 c/lt.	\$3500
Fuente de alto voltaje	1	\$1500	\$1500
Contenedor de PVC	1	\$250	\$250
Suministro de aire (secador)	1	\$550	\$550
Accesorios	-	\$15000	\$15000
TOTAL			\$21280

En este caso, los únicos gastos mensuales son el salario de un operador de U\$D 264 y U\$D 1000 en gasto de energía eléctrica, y U\$D100 de mantenimiento. Además al igual que en el análisis del método anterior, los ingresos serán reducidos a la mitad. Y tomando en cuenta la fragilidad y simplicidad que implica el método sus equipos solo serán devaluados en 3 años.

Para 10 años se estima lo siguiente:

TIR	171%
VAN	15085,9
B/C	3,05
Tiempo recupe.	1años

Tabla 6.5 Costo de implementación de el procedimiento de espectroscopia infrarroja

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Luz halógena	1	\$120	\$120
Filtro infrarrojo	1	\$60	\$60
Colimadores	2	\$40	\$80
Filtro acústico-óptico	1	S/R	S/R
Placa de aluminio reflectante	1	\$40	\$40
Sensor óptico (fotodiodo)	1	\$25	\$25
Computador y convertidor A/D	1	\$1200	\$1200
Accesorios	-	\$10000	\$10000
TOTAL			\$11525+S/R

En es un método de macroclasificación se estimara como valor del AOTF U\$D150 por lo que la inversión inicial será de U\$D11655 que se depreciara en 5 años, con un costo mensual de U\$D 1000 por energía eléctrica, y U\$D 264 por el salario de un operador, mas U\$D200 por mantenimiento

TIR	249%
------------	-------------

VAN	18245,7
------------	----------------

B/C	3,92
------------	-------------

Tiempo recupe.	1 años
-----------------------	---------------

Tabla 6.6 Costo de implementación de el procedimiento de luz polarizada para separación de PET y PVC

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Luz monocromático	1	\$120	\$120
Polarizadores	2	\$30	\$60
TOTAL			\$180

Este método no se puede realizar un análisis financiero, pues es imposible llegar a los 1000Kg/día

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Los métodos de identificación de polímeros abarcan varios campos, como física, química, electricidad, minería y termodinámica.
- Para la implementación industrial, los métodos de macroclasificación que trabajan con la obtención del espectro son los más precisos por que se enfocan en la naturaleza misma de los elementos y no en sus propiedades físicas como los otros.
- Un campo que solo se menciona en este trabajo pero que es de gran ayuda para la industria es la caracterización de los polímeros por colores, este proceso solo lo puede hacer la espectroscopia infrarroja
- La mayoría de los polímeros no son puros, puesto que en la industria se mezclan de acuerdo a sus necesidades, por tal motivo los espectros de la espectroscopia infrarroja o la DSC no son exactos al patrón, pero siempre seguirán la misma tendencia.
- En los métodos de microclasificación se adiciona, como se puede comprobar, una variable mas que es el tamaño del material a separar.
- Existen otras maneras que se emplea para determinar la naturaleza del material, algunas desde características de la fabricación misma, o como el sonido que producen al caer, pero esto se compara al ensayo a la llama pues solo funciona cuando se sabe que todo el grupo es del mismo material.
- Siempre la productividad de una empresa de reciclaje está subordinada a la productividad, y por consiguiente demanda de empresas de productos.

- Es importante en un método de clasificación no alterar las propiedades del material, como sobre calentarlo o quemarlo.
- Los plásticos tiene un tiempo de vida útil bajo sus propiedades fundamentales, razón por la cual a pesar de conseguir un óptimo resultado siempre nos encontraremos que el plástico tiene que ser desechado.
- Los productos de plástico blanco o transparentes siempre son de material virgen, esto quiere decir que por más que se separe estos colores, en el reproceso nunca tendrán el mismo color
- En el ensayo a la llama no se pudo escuchar su característica al quemarse por el ruido que producía el soplete de GLP, además se evidencio que solo se necesita empezar la ignición del plástico para observar su comportamiento y no mantenerlo en la llama, esto debido a que los datos registrados dependen del polímero exclusivamente.

7.2 RECOMENACIONES

- Cada método estema de análisis y estudio extenso, razón por la cual se debe profundizar en trabajos posteriores cada método, sobre todo en su implementación y automatización.
- El problema más grave radica en la separación del PET y el PVC, por lo que se recomienda poner más énfasis en los procedimiento que separen estos, porque además el PVC no puede analizarse mediante el FT-IR
- No es nunca recomendable adoptar un solo procedimiento de caracterización de polímeros
- Aun con varios métodos de separación de plásticos, siempre es recomendable seleccionar los desechos desde la fuente y no mesclar con otros elementos

- Muchas veces los plásticos vienen unidos a metales, por lo que se necesita una separación previa de estos.
- Se recomienda diseñar un área de investigación de polímeros en la ESPE, ya sea en el centro de investigaciones, o en alguna facultad

BIBLIOGRAFIA

1. K. KHAIT. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Northwestern University. Recycling Plastics Vol. 7. s.f. p 660.
2. Enciclopedia de la Técnica y Mecánica, Tomo VI: polímero pág. 119
3. DONALD R. ASKELAND. Ciencia e ingeniería de los materiales, 3ra. Edición, International Thompson Editores, 1998. pp. 479,482,483
4. DONALD R. ASKELAND. Ciencia e ingeniería de los materiales, 3ra. Edición, pág. 479,482,483
5. DONALD R. ASKELAND. Ciencia e ingeniería de los materiales, 3ra. Edición, pág. 494
6. DONALD R. ASKELAND. Ciencia e ingeniería de los materiales, 3ra. Edición, pág. 491
7. www.ornl.gov/info/reports/1989/3445603282472.pdf - Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy
8. www.petplastic.net - B&R Industries
9. www.aseplas.org – Asociación Ecuatoriana de Plásticos
10. www.journeytoforever.org/biofuel_library/plasticsidentification.pdf
11. www.matbase.com; www.polymerweb.com
12. Europa. comisión de las comunidades europeas. libro verde, cuestiones medioambientales relacionadas con el PVC, Bruselas, 2000, pp. 4-6

13. es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno
14. EDWARD A. BRUNO, Automated Sorting of Plastics for Recycling, <http://www.p2pays.org/ref/09/08620.pdf>
15. http://webmail.fq.edu.uy/~organica/org104/org104_ir_1.pdf
16. http://www.liceopaula.com.ar/Club_Ciencias/ASIMOV/tema075.pdf
17. SANTIAGO V. LUIS LAFUENTE, Ma. ISABEL BURGUETE AZCÁRATE, BELEN ALTAVA BENITO, Introducción a la química orgánica, Publicaciones de la Universidad de Jaume
18. Instituto Brasileiro del PVC
19. Edición especial para proyectos de formación profesional en los Institutos Salesianos; Tecnología mecánica, practica 3, curso superior; Manual para el instructor; Publicado por EDIBOSCO, Cuenca/Ecuador.
20. ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_MeTODOS_DE_ANALISIS_TERMICO.pdf
21. GJERGJ DODBIBA, JUN SADAHI, ATSUSHI SHIBAYAMA, TOYOHISA FUJITA, Sorting Techniques for Plastics Recycling, Department of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, University of Tokyo, Japan The Chinese Journal of Process Engineering, Vol 6, No. 2, 2006

22. SOMSAK SAISINCHAI, Separation of PET from PET&PVC mixture by froth flotation technique, Department of Mining and Petroleum Engineering, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand
23. <http://www.scribd.com/doc/21869345/12-Separation-of-Pp-From-Pp-Pe-Mixture-by-Froth-Flotation-Technique>
24. J.M. BARCALA RIVEIRA, J. ALBERDI PRIMICIA, J.J. NAVARRETE MARIN, J.C. OLLER GONZALEZ, Clasificación automática de envases plásticos, Laboratorio de Electrónica y Automática, CIEMAT, Madrid, España,
25. DANIEL DÍAZ, DAVID W. HAHN, ALEJANDRO MOLINA, Identificación de polímeros mediante espectroscopia de emisión de plasmas producidos por laser (LIBS), Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia Medellín- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida, 2009.
26. AMAR TILMATINE, KARIM MEDLES, MOHAMED YOUNES, ABDELBER BENDAOUD, Roll-type versus Free-fall Electrostatic Separation of Tribocharged Plastic Particles, Lucian Dascalescu, Fellow, IEEE
27. GJERGJ DODBIBA, ATSUSHI SHIBAYAMA, T. MIYAZAKI TOYOHISA FUJITA Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone, Satellite Venture Business Laboratory, Faculty of Engineering and Resources Sciences, Akita University, Japan.
28. Un método y un aparato para separar material de desecho, OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS, 01/11/2007 (párrafo 10)

29. NICHOLAS P. CHEREMISINOFF, ANTON R. DAVLETSHIN, A Guide to Safe Material and Chemical Handling.

30. GREET Transportation Fuel Cycle Analysis Model, GREET 1.8b, developed by Argonne National Laboratory, Argonne, IL, released May 8, 2008.

31. PERRY, R. H. AND GREEN, Perry's Chemical Engineers' Handbook, D.W, 7th Edition. McGraw Hill.

32. JOSE MARIA TRASANCOS, Instalaciones eléctricas en media y baja tensión, sexta edición, pp. 27

33. JULIAN FERNANDEZ FERRER, MARCOS PUJAL CARRERA, Iniciación a la física, Editorial Reverté

34. Hoja de datos para GLP INDURA - NCh 2245 Of.03