



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA
Y TECNOLOGÍA AVANZADA**

**“DESARROLLO DE UNA TECNOLOGÍA DE
SEPARACIÓN SUSTENTABLE DEL ENVASE
MULTILAMINADO ASI COMO LA SEPARACIÓN DE
SUS COMPONENTES Y SUS POSIBILIDADES DE
SUBPRODUCTOS COMERCIALES”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

**PRESENTA
DANAÉ SAMARA SÁNCHEZ SANDOVAL**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ARTURO LÓPEZ MARURE**



ALTAMIRA, TAMAULIPAS, MEXICO.

2013



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 4 del mes de Marzo del año 2013, el (la) que suscribe Danaé Samara Sánchez Sandoval alumno(a) del Programa de Tecnología Avanzada, con número de registro A110361, adscrito(a) al Centro de Investigación En Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN, Unidad Altamira, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) Doctor Arturo López Marure y cede los derechos del trabajo titulado Desarrollo de una tecnología de separación sustentable del envase multilaminado así como la separación de sus componentes y sus posibilidades de subproductos comerciales al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones danaesanchezs17@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Danaé Samara Sánchez Sandoval
Nombre y firma del alumno(a)



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

México, D.F. a 9 de noviembre del 2011

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA Alt. en su sesión ORD. RCP No. 18/11 celebrada el día 23 del mes de NOV-11 conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

<u>Sánchez</u> Apellido paterno	<u>Sandoval</u> Apellido materno	<u>Danaé Samara</u> Nombre (s)
Con registro:		
A	1	1
0	3	6
1		

Aspirante de:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Desarrollo de una tecnología de separación sustentable del envase Tetra Pack así como la separación de sus componentes y sus posibilidades de subproductos comerciales.

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:
Diseño de un equipo de separación selectiva y triaje sustentables de los envases Tetra Pack, desarrollo de un procedimiento económico y socialmente viable que permita la separación de las capas de polietileno del aluminio del envase Tetra Pack y proponer posibilidades de subproductos comerciales del papel, aluminio y polietileno que sea recuperado en el proceso.

2.- Se designa como Director de Tesis al Profesor:
Dr. Arturo López Marure

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en:
IPN CICATA Unidad Altamira
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Director(a) de Tesis

Dr. Arturo López Marure

Aspirante

Danaé Samara Sánchez Sandoval

Presidente del Colegio

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA
DEL IPN
UNIDAD ALTAMIRA

Dr. Atencio L. Flores Vega



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Altamira, Tamaulipas siendo las 09:00 horas del día 4 del mes de Marzo del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Altamira para examinar la tesis titulada:
"DESARROLLO DE UNA TECNOLOGÍA DE SEPARACIÓN SUSTENTABLE DEL ENVASE MULTILAMINADO ASI COMO LA SEPARACIÓN DE SUS COMPONENTES Y SUS POSIBILIDADES DE SUBPRODUCTOS COMERCIALES"

Presentada por el alumno:

<u>SANCHEZ</u>	<u>SANDOVAL</u>	<u>DANAÉ SAMARA</u>
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)
Con registro:		
A	1	1
0	3	6
1		


aspirante de:

MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis


 Dr. Arturo López Marure
 (PROFESOR COLEGIADO 6673-EC-09)


 Dr. Luis Vidal Ponce Cabrera
 (PROFESOR COLEGIADO 6675-ED-09)



 Dr. Eugenio Rodríguez González
 (PROFESOR COLEGIADO 6305-EA-09)


 Dra. Teresa Flores Reyes
 (PROFESOR COLEGIADO 6946-EA-10)


 Dr. Alfredo Márquez Herrera
 (PROFESOR COLEGIADO)


 Dr. Rogelio Ortega Izaguirre
 (PROFESOR COLEGIADO 8242-EA-12)

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


 Dra. Aidé Minerva Torres Huerta
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
 Y TECNOLOGÍA AVANZADA
 DEL I.P.N.
 UNIDAD ALTAMIRA

DEDICATORIA

A Dios:

Por haberme permitido llegar hasta esta etapa de mi vida y haberme dado la salud y la fuerza para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres:

***Rubí Sandoval y Miguel Sánchez**, quienes son y serán las personas más importantes de mi vida, por su amor, comprensión, atenciones y apoyo incondicional tanto moral como financiero en todas las facetas de mi vida, por la educación y la fortaleza que me han dado para llevar a cabo mis sueños y metas, sin dejarme rendir*

Muchísimas Gracias Papas

A mis hermanos, Iván y Mely:

*Por ser los duendecillos que me alegraban aun en los días más estresantes, y estaban ahí dándome un beso y un abrazo cuando más lo necesitaba, mis hermanitos **¡los AMO!**.*

A Adrián:

Por entregarme tu amor de manera incondicional y ser mi fuerza cuando estaba por desistir. Porque con tu amor me enseñaste que todo es posible y que no hay nada en el mundo que no pueda hacer.

A mis amigos, Myrna, Flor, Moni, Nere, Xare, Jaime y Orozco:

Por vivir esta etapa conmigo, apoyándome en todo momento, por cada momento de risa y de enojos, por ser grandes amigos y compañeros y por el apoyo que me brindaron para que pudiera concluir esta etapa de manera exitosa.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca que me brindó durante los dos años del desarrollo de mi trabajo de maestría.

Agradezco al Dr. Arturo López Marure, director de este proyecto, por su apoyo y orientación en el desarrollo y conclusión de este trabajo de tesis.

A M.P. Miguel Ángel Domínguez Sánchez por sus observaciones y comentarios, los cuales enriquecieron este proyecto.

Contenido

Índice de Figuras	2
Índice de Tablas	4
Abreviaturas y siglas	5
Glosario	6
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
CAPITULO 1	11
INTRODUCCIÓN	11
1.1 JUSTIFICACIÓN	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.3 HIPÓTESIS	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.5 ESTADO DEL ARTE	15
CAPÍTULO 2	18
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1 MATERIALES	18
2.1.1 TETRAPACK	18
2.1.1.1 DISEÑO DE ENVASE TETRAPACK	18
2.1.1.2 CICLO DE VIDA DEL ENVASE TETRA PACK	20
2.1.2 CELULOSA	20
2.1.3 POLIETILENO	22
2.1.4 ALUMINIO	23
2.2 PROCESOS DE SEPARACIÓN	24
2.2.1 SEPARACIÓN POR HIDROPULPEO	24
2.2.2 SISTEMA DE SEPARACIÓN CON EMISIÓN TÉRMICA	25
2.2.3 SISTEMA DE SEPARACIÓN CON MICROONDAS	26
2.2.4 SISTEMA DE SEPARACIÓN CON LASER	28
CAPÍTULO 3	29
TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	29
3.1 FTIR (ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER)	29
3.2 DRX (DIFRACCIÓN DE RAYOS X)	30

3.3	CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO.....	31
3.4	MEB (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO).....	32
3.5	EED (ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA).....	33
CAPÍTULO 4.....		34
PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO		34
4.1	SEPARACIÓN POR MEDIO DE HIDROPULPEO	35
4.1.1	PRUEBA 1. SISTEMA DE AGITACIÓN CON BARRAS MAGNÉTICAS.....	35
4.1.2	PRUEBA 2. SISTEMA DE AGITACIÓN CON 3 ASPAS.....	37
4.1.3	PRUEBA 3. SISTEMA DE AGITACIÓN CON 4 ASPAS.....	38
4.2	SEPARACIÓN DE POLIETILENO Y ALUMINIO	39
4.2.1	PRUEBA 1. SISTEMA DE SEPARACIÓN DE EMISIÓN TÉRMICA.....	40
4.2.2	PRUEBA 2. SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROONDAS.....	43
4.2.3	PRUEBA 3. SISTEMA DE SEPARACIÓN POR LASER.....	47
CAPITULO 5.....		49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		49
5.1	SEPARACIÓN POR MEDIO DE HIDROPULPEO	51
5.2	SEPARACIÓN DEL FILME DE POLIETILENO Y ALUMINIO.....	64
5.3	PROPUESTA DE SUBPRODUCTOS	69
CAPITULO 6.....		71
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN		72
ANEXO.....		73
CONCEPCIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN Y TRIAJE DE ENVASES MULTILAMINADOS.....		74
BIBLIOGRAFIA.....		76

Índice de Figuras

Figura 1.	Envases multilaminados vendidos mundialmente del año 1993 al 2011 [7]..	12
Figura 2.	Componentes del envase laminado tipo Tetra Pack [24]	19
Figura 3.	Unidad celobiosa de la cadena de celulosa. [29]	21

Figura 4. Espectro FTIR de la celulosa [31].....	22
Figura 5. Estructura general de etileno y polietileno [33].....	23
Figura 6. Transferencia de calor por convección forzada [40].....	26
Figura 7. FTIR Perkin Elmer Spectrum 100.....	29
Figura 8. DRX.....	30
Figura 9. Calorímetro diferencial del barrido.....	31
Figura 10. Microscopio Electrónico de Barrido modelo PHENOM.....	32
Figura 11. Microscopio Electrónico de Barrido modelo Jeol JSM-5300.....	33
Figura 12. Diagrama de bloques del procedimiento metodológico.....	34
Figura 13. Diagrama de proceso de hidropulpeo.....	35
Figura 14. Sistema de agitación con barras magnéticas.....	36
Figura 15. Sistema de agitación con 3 aspas.....	37
Figura 16. Sistema de agitación con 4 aspas.....	38
Figura 17. Diagrama de proceso de separación de polietileno y aluminio.....	39
Figura 18. Sistema de emisión térmica directamente en la muestra.....	40
Figura 19. Sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 10cm.....	41
Figura 20. Sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 32cm.....	43
Figura 21. Contenedor refractario de arcilla roja.....	44
Figura 22. Sistema de separación por microondas con contenedor de arcilla.....	44
Figura 23. Contenedor refractario de alúmina.....	45
Figura 24. Sistema de separación por microondas con contenedor de alúmina.....	46
Figura 25. Contenedor refractario de caolín y tergoopor [52].....	46
Figura 26. Contenedor de carburo de silicio. [52].....	46
Figura 27. Sistema de separación por LASER Nd:YAG.....	47
Figura 28. Micrografía por MEB del envase multilaminado, donde se muestra la unión de 5 capas que conforman este envase.....	49
Figura 29. Micrografía por MEB del envase multilaminado, donde se muestra la unión de la capa de cartón con la capa de polietileno.....	50
Figura 30. Pulpa después de hidropulpeo.....	51
Figura 31. Cribado de la pulpa separada del envase multilaminado.....	51
Figura 32. Pulpa después de hidropulpeo.....	52
Figura 33. Cribado de la pulpa separada del envase multilaminado.....	52
Figura 34. Pulpa después de hidropulpeo.....	53
Figura 35. Cribado de la pulpa separada del envase multilaminado.....	53
Figura 36. Espectro de las fibras de papel reciclado de los envases multilaminados en sistema de agitación de 4 aspas.....	55
Figura 37. Comparación de los espectros de las fibras de papel reciclado de los EM, antes y después del segundo calentamiento.....	56
Figura 38. Comparación de los espectros de las fibras de papel reciclado de los EM, antes y después del segundo calentamiento.....	57
Figura 39. Termograma de referencia con calorimetría diferencial de barrido.....	58

Figura 40. Termograma de las fibras con calorimetría diferencial de barrido.....	59
Figura 41. Termograma de las fibras con calorimetría diferencial de barrido.....	59
Figura 42. Micrografías de fibras de celulosa, obtenidas en sistema de agitación con barras magnéticas.....	60
Figura 43. Micrografías de fibras de celulosa, obtenidas en sistema de agitación con 3 aspas.....	61
Figura 44. Micrografías de fibras de celulosa, obtenidas en sistema de agitación con 4 aspas.....	61
Figura 45. Impurezas en fibras de celulosa recuperadas.....	62
Figura 46. Oxidación de polietileno al aplicar calor al filme de p-p-a-p.....	64
Figura 47. Muestras sin reacción por medio de inyección de aire caliente.....	65
Figura 48. Análisis en el microscopio óptico del filme de aluminio y polietileno.....	69
Figura 49. Concepción del proceso de separación y triaje de envases.....	75

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros para sistema de agitación con barras magnéticas.....	36
Tabla 2. Parámetros para sistema de agitación con 3 aspas.....	38
Tabla 3. Parámetros para sistema de agitación con 4 aspas.....	39
Tabla 4. Parámetros para sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 10cm...	42
Tabla 5. Características del contenedor refractario. [50].....	44
Tabla 6. Características del contenedor refractario. [51].....	45
Tabla 7. Parámetros y resultados del sistema de agitación con barras magnéticas.....	52
Tabla 8. Parámetros y resultados del sistema de agitación de 3 aspas.....	53
Tabla 9. Parámetros y resultados del sistema de agitación de 4 aspas.....	54
Tabla 10. Asignación de las bandas de absorción de FTIR de la hoja. [31].....	55
Tabla 11. Resultados de EDS para las 3 muestras analizadas.....	63
Tabla 12. Resultados con la inyección de calor con guía de cuarzo de 20cm.	65
Tabla 13. Resultados obtenidos con la inyección de calor con guía de 10cm.....	66
Tabla 14. Parámetros para la separación por microondas con contenedor refractario de arcilla.....	67
Tabla 15. Resultados Obtenidos en la prueba con contenedor de alto contenido de alúmina.....	67

Abreviaturas y siglas

ALEER	Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación
BCA	Basureros de cielo abierto
DRX	Difracción de Rayos X
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
ECF	Elementary Chlorine Free
EM	Envases Multilaminados
EVA	Etilen vinil acetato
FIR	Far Infrared Radiation (Infrarrojo lejano)
FTIR	Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier
IR	Radiación Infrarroja
ISO	International Organization for Standardization
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LLDPE	Polietileno Lineal de Baja Densidad
MEB	Microscopia electrónica de barrido
MPa	Mega Pascales
Nd:YAG	Niodimio dopado con ytrio, aluminio y granate
NIR	Near Infrared Radiation (Infrarrojo cercano)
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
p-p-a-p	Polietileno-polietileno-aluminio-polietileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
UHT	Ultra High temperatura (Ultra Alta Temperatura)
RSPM	Separador de No Metales por Corrientes de Foucault
SEM	Scanning Electron Microscope
TCF	Totally chlorine free
Rpm	Revoluciones por minuto

Glosario

Basura: Residuos sólidos con tendencia a la putrefacción y materiales residuales mezclados.

Bauxita: roca constituida por óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro del que se extrae el aluminio

Biofilm: es una estructura colectiva de microorganismos que se adhiere a superficies vivas o inertes y está revestida por una capa protectora segregada por los propios microorganismos

Celulosa: Polisacárido formado por unidades de glucosa con uniones β 1-4.

Ciclo de Vida: Es una secuencia de fases conceptuales relacionadas con un producto, proceso, servicio, instalación o empresa.

Contaminante: Todo elemento, materia, sustancia, forma de energía térmica, radiaciones ionizantes, vibraciones o ruido que al incorporarse o actuar en cualquier elemento del medio físico, alteran o modifican su estado y composición o bien, afecten la flora, la fauna o la salud humana.

Convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas.

Degradable: Cualidad que presentan determinadas sustancias o compuestos, para descomponerse gradualmente mediante procesos biológicos sin dañar el ambiente.

Disposición Final: Depósito permanente de los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños a los ecosistemas.

Envase: Todo producto de cualquier material, que se utilice para contener, proteger, manejar y presentar bienes (desde materias primas a bienes procesados) desde el productor al usuario o consumidor.

Envases asépticos: son envases esterilizados antes de ser llenados con alimentos Ultrapasteurizados (UHT), lo que resulta en un producto estable por largo tiempo.

Envase Tetra Brik®: Envase de cartón laminado con aluminio, polietileno y celulosa que se usa para conservar productos alimentarios como leche, jugos, salsas, etc.

Estanqueidad: Cualidad de lo que es estanco, cerrado e incomunicado.

Extrusión: se cataloga como el proceso por el cual es posible producir productos acabados o semi acabados en régimen continuo.

Foil: Hoja fina de metal

Generación: Cantidad de residuos sólidos originados por una determinada fuente en un intervalo de tiempo.

Gestión: Conjunto de normas operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación para la toma de decisiones.

Guía de onda: es cualquier estructura física que guía ondas electromagnéticas.

Pirólisis: es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno.

Plasma: cuarto estado de agregación de la materia, un estado fluido similar al estado gaseoso pero en el que determinada proporción de sus partículas están cargadas eléctricamente y no poseen equilibrio electromagnético,

Polietileno: Polímero termoplástico del etileno. Se representa con su unidad repetitiva $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$.

Proceso sustentable: proceso que permite satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras.

Reciclaje: Separación de determinada materia residual, procesándola para que pueda ser utilizada nuevamente como materia útil para productos que pueden o no ser similares al original.

Residuos Urbanos: Los generados en casa habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases o embalajes, incluyendo los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, que no sean considerados como de manejo especial.

Reúso o reutilización: Empleo de un envase o embalaje sin que sean sujetos de procesos industriales de transformación.

Sólidos suspendidos: Partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución.

Tratamiento: Procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen.

Triaje: Selección fina de los materiales a reutilizar.

RESUMEN

El crecimiento acelerado que han experimentado los centros urbanos en las últimas décadas se manifiesta en el mayor consumo de productos de fácil desecho, esta situación hace que el manejo de los diferentes envases multilaminados se torne en una situación cada vez más compleja.

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo realizar una investigación sobre las diferentes posibilidades de **separación sustentable** del **envase multilaminado** desde un punto de vista de ahorro energético. Asimismo desarrollar un procedimiento económico y socialmente viable que permita la separación de las capas de **cartón, polietileno y aluminio** del envase multilaminado, proponiendo algunas posibilidades de **subproductos comerciales** del papel, aluminio y polietileno que sean recuperados durante el proceso.

La metodología utilizada consistirá en la separación y selección de los envases de los demás residuos, así como en la separación de cada componente del envase y su síntesis para la obtención de subproductos comerciales.

ABSTRACT

The intensive growth that the urban centers have experienced in the last decades demonstrates in the major consumption of products of easy waste. This situation does that the managing of the different multilaminated packings returns in a situation increasingly complex.

The present work of investigation has for aim realize an investigation on the different possibilities of **sustainable separation** of the **packing multilaminated** from a point of view of energetic saving. Likewise, to develop an economic and socially viable procedure that allows the separation of the caps of **carton**, **polyethylene** and **aluminium** of the multilaminated packing, proposing some possibilities of **commercial by-products** of the paper, aluminium and polyethylene that are recovered during the process.

The used methodology will consist of the separation and selection of the packings of other residues, as well as of the separation of every component of the packing and his synthesis for the obtaining of commercial by-products.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Los envases son productos que pueden estar fabricados en una gran cantidad de materiales y que sirven para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías en cualquier fase de su proceso productivo, de distribución o venta [1]. Los envases han jugado papeles diferentes e importantes a través de la historia. Con la evolución de la sociedad los envases han cambiado también, reflejando nuevos requisitos y características sobre estos. Existen desde los confeccionados con papel, vidrio, metal, hasta los que emplean diversos materiales para su elaboración como el envase multilaminado [2].

En México, cada año, se producen 30 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos, de las cuales 40% corresponde a residuos orgánicos; 20% papel y cartón; 8% vidrio; 1% envases multicapas (EM), y el restante 31% está compuesto por plástico, lámina, aluminio y loza [3].

En la ciudad de México se consumen casi 3 millones de envases multilaminados al día, por lo que la contaminación por estos residuos es tangible ya que su composición se ha vuelto más compleja y heterogénea, pues cada día se agregan nuevos tipos de envases, muchos de los cuales no se han evaluado suficientemente desde el punto de vista del impacto en la salud de la población o en el ambiente [4].

Durante años se ha criticado el envase multilaminado por ser un sistema de envase no retornable y que contamina el medio ambiente [5]. Actualmente se cuenta con diversos tratamientos para aquellos envases que están fabricados con un solo material como el plástico, el vidrio, el cartón y el metal, a comparación de los envases multilaminados, los cuales están compuestos por varios materiales, de la parte externa hacia adentro se encuentra una capa de polietileno, luego una de cartón, una más de polietileno, otra de aluminio y

finalmente dos capas de polietileno; lo que implica varias fases para su separación y aprovechamiento [6].

La fabricación de envases obedece a un ciclo de producción y consumo, y el impacto que éstos ocasionan al ambiente son consecuencia del inadecuado manejo post-consumo [5].

En la figura 1, se observa el crecimiento de la venta de envases multilaminados mundialmente en los años de 1993 a 2011, en el cual se observa un crecimiento constante en el consumo de este tipo de envases, lo cual ha ido generando un problema a nivel ambiental [7].

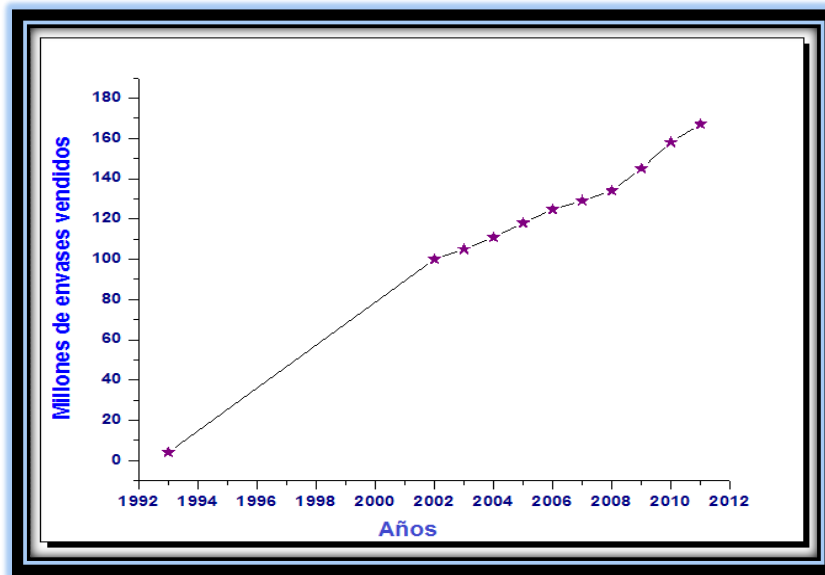


Figura 1. Envases multilaminados vendidos mundialmente del año 1993 al 2011 [7].

A pesar de que los envases multilaminados corresponden al 1% de los residuos sólidos, es importante su recuperación y reutilización, ya que por cada tonelada de envases multilaminados se ahorra [8]:

- 3000 KW de energía eléctrica
- 100000 L de agua
- 221 kg. de combustible (petróleo)
- 1500 kg de madera tratada y eliminación de residuos.

También se ahorran materias primas [9]:

- Por cada 1000 kg de envases se obtienen 750 kg de papel kraft.
- Por cada 2 toneladas de EM se ahorra una tonelada de petróleo
- Cada envase reciclado permite un ahorro energético equivalente al consumo de una bombilla durante una hora y media.

Y si se reciclara solamente el 10% de envases multilaminados anualmente en México [9]:

- Se salvaría lo equivalente a la mitad de arboles del bosque de Chapultepec.
- Se ahorraría lo equivalente a la cantidad de agua consumida por 1500 personas en un año.
- Y se ahorraría lo equivalente al combustible utilizado por un millón de autos en una semana.

Por lo que este proyecto se centra en establecer un proceso que permita la separación de las capas que conforman el envase multilaminado, a bajo costo y recuperando los materiales con el mayor grado de pureza.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista técnico existen soluciones para el manejo de los envases multilaminados, sin embargo, representan soluciones onerosas y energéticamente costosas y no sustentables, además es necesario contar con la infraestructura de un sistema de separación y triaje, así como con datos de generación, entre otros factores para provocar el aprovechamiento sustentable de los envases.

En la actualidad los procesos de pirolisis empleados para la separación de los compuestos del envase multilaminado son limitados, además de la obtención de compuestos que son contaminantes y es necesario tratarlos para hacerlos inofensivos al medio ambiente [10]. Mientras que en el proceso de plasma se requiere gran cantidad de energía para que se lleve a cabo la separación, lo que eleva el costo de dicho proceso [11].

Sin embargo, no ha habido desarrollos tecnológicos que planten una sinergia entre un proceso bajo en consumo energético empleando irradiación térmica y una vía química; de tal forma que no solamente se separan los compuestos del envase sino también se ve el potencial como subproductos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento acelerado que han experimentado los centros urbanos en las últimas décadas se manifiesta en el mayor consumo de productos de fácil desecho, esta situación hace que el manejo de los diferentes envases multilaminados se torne en una situación cada vez más compleja.

No obstante el gran problema que representa el manejo y reciclado de estos envases, en nuestro país no ha habido estudios serios de investigaciones científicas, para una separación sustentable de los compuestos del envase que involucre un bajo consumo energético.

1.3 HIPÓTESIS

Mediante la sinergia de un proceso químico y una fuente de irradiación térmica es posible el separar cada uno de los compuestos del envase multilaminado de una manera sustentable y a bajo costo, coadyuvando a la obtención de materias primas como subproductos potencialmente comercializables.

1.4 OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar un proceso de separación sustentable de las capas que constituyen el envase multilaminado y proponer algunas posibilidades de subproductos comerciales.

PARTICULARES

- Modificar el procedimiento empleado para la separación del cartón de los envases multilaminados.
- Desarrollar procedimientos económicos y socialmente viables que permitan la separación de las capas de aluminio y polietileno del envase multilaminado
- Proponer algunas posibilidades de subproductos comerciales del papel, aluminio y polietileno que sean recuperados en el proceso.

1.5 ESTADO DEL ARTE

- En el 2005, Núñez Álvarez estudió la problemática ambiental que existe en México, debido a la contaminación ocasionada por los residuos de los envases tetra pack, explicando algunas soluciones para la recuperación de los componentes de estos envases. Además de realizar algunas actividades experimentales complementarias con mezclas de solventes para la separación de las diferentes capas del envase. Pero no obtuvo ningún resultado satisfactorio en cuanto a la separación de las capas del envase multilaminado [12].

- También en el 2005, Von Zuben desarrolló la tecnología de plasma para la recuperación del aluminio y plástico de los envases de tetra pack. Dando pie a la inauguración en Brasil de la primera planta mundial de reciclaje de envases multicapa con tecnología plasma. Pero esta es una tecnología que requiere, que el proceso sea con atmosfera controlada, lo cual elevaba el costo [13].
- En 1999, Cases Rocati patentó un procedimiento para la recuperación del aluminio y energía a partir de un proceso de pirolisis al que los envases usados tetra pack fueron sometidos, además de la fabricación del horno para realizar dicho procedimiento. [14] El problema de este proceso es que se obtenían compuestos contaminantes, los cuales tenían que ser recuperados y tratados, elevando el costo en el proceso [10].
- En 1997, Corma Cano et al. Desarrollaron un procedimiento para separar el polietileno y el aluminio de las hojas de aluminio recubiertas de polietileno de los residuos de envases tetra pack. Empleando disolventes orgánicos tales como hidrocarburos clorados, alcanos, olefínicos, aromáticos o mezclas de ellos e hidrocarburos halogenados. En este procedimiento además de no lograr una separación efectiva en las capas del envase multilaminado, se obtenían compuestos contaminantes [15].
- En 1979, Froast diseñó un equipo en el que las películas de polietileno contaminadas con fibras de papel se someten a un tratamiento que convierte las fibras de papel en pulpa. El equipo de molienda con bolas de geometría y diámetro uniformes que son separadas por gravedad al ser arrastradas por una corriente de aire. En este proceso se requiere mayor cantidad de energía para llevar a cabo dicha separación, lo que da como resultado, un proceso costoso [16].
- En Italia, el polietileno y el aluminio se utilizan para la producción de un nuevo material plástico, Ecoallene® *. [17] Este es un material práctico y resistente, suministrado en gránulos y listo para

ser utilizado en varias aplicaciones de industrias de plástico. Pero no se logra la reutilización de los materiales por separado [18].

- En China una tecnología de tratamiento químico ha sido desarrollado para separar el polímero y el aluminio. La mezcla se pone en un tanque de reacción que reduce la adherencia entre las diferentes capas, y los materiales pueden ser separados mecánicamente y utilizarse en nuevos productos. En este proceso, como la separación es química y mecánica, daña la estructura de ambos materiales, lo que reduce las posibilidades de reutilización [19].

En este trabajo, proponemos la separación de las 3 capas que constituyen a los envases multilaminados, empleando el hidropulpeo con una temperatura de 80°C para la separación de la capa de cartón. Y para la separación de las capas de polietileno y aluminio se emplearan cuatro procesos, los cuales son emisión térmica, microondas y laser.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MATERIALES

Los materiales complejos son los envases en que se mezclan dos o más de los materiales como aluminio, plásticos y papel, como ocurre en la fabricación de envases flexibles que se utilizan como envolturas de botanas y chocolates [20]. En este proyecto se centra el estudio en los envases multilaminados, como los son los envases tetra pack.

2.1.1 TETRAPACK

En 1952 el primer envase aséptico en el mercado apareció en forma de tetraedro, lo que llamó mucho la atención debido a su forma poco convencional; este envase fue llamado Tetra Classic®. En 1963 se lanzó al mercado el envase Tetra Brik Aseptic®. Desde entonces Tetra Pack ha incrementado sus actividades, incluyendo el procesado de alimentos líquidos y la diversidad de los productos que se encuentran en el mercado [21].

2.1.1.1 DISEÑO DE ENVASE TETRAPACK

Los envases de Tetra Pack están conformados por 6 capas que evitan el contacto con el medio externo, y aseguran que los alimentos lleguen a los consumidores con todas sus propiedades intactas [22].

Cada una de sus capas tiene un objetivo específico; posiblemente la capa más importante para atraer al consumidor hacia el envase como producto en el mercado, sean las tintas que se encuentran en la parte exterior del mismo. Las demás capas son fundamentales ya que ellas evitan el deterioro de los

alimentos y bebidas por microorganismos, además de minimizar los costos por derrame y transporte [23].

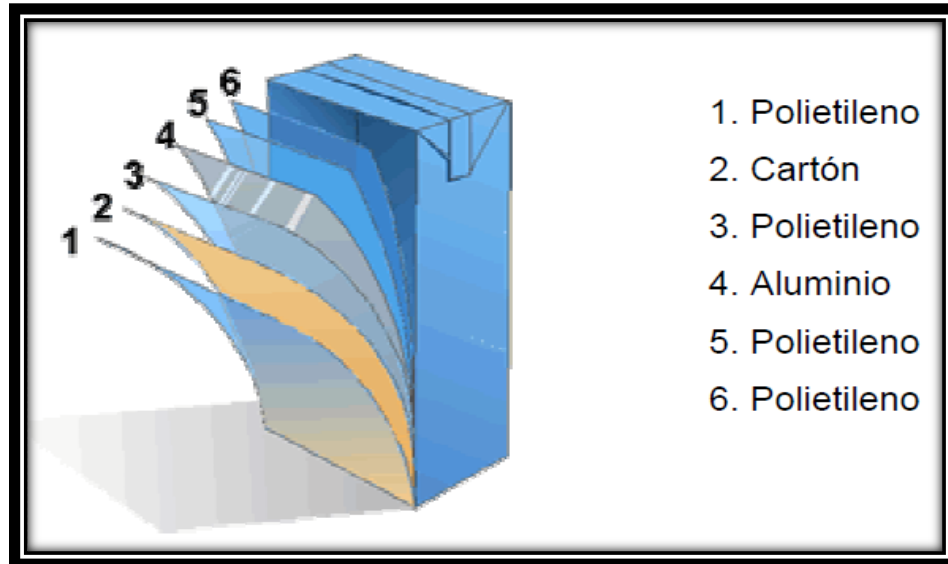


Figura 2. Componentes del envase laminado tipo Tetra Pack [24]

El envase, figura 2, está compuesto de la siguiente manera [24]:

- **Papel:** El envase está conformado por 75% de papel, garantizando su estabilidad y resistencia.
- **Aluminio:** se utiliza sólo en los cartones para productos de ultra alta temperatura, UHT (por sus siglas en ingles, Ultra high temperatura), UHT/larga duración. Representa el 5% del peso del cartón para bebidas. El envase aséptico (de larga duración) necesita una barrera eficaz contra el oxígeno. [25] La hoja de aluminio permite el almacenamiento seguro a temperatura ambiente de los productos envasados y así ahorra la energía que sería necesaria para su refrigeración tanto en el transporte como en el almacenamiento. Su fino espesor que se ha reducido de 9 a 6,35 μm en los 20 últimos años. [6]
- **Polietileno:** Por término medio, el polietileno representa el 15-20% del peso de cartones para bebidas. El polietileno proporciona estanqueidad

al contenido líquido y mantiene unidos los diferentes materiales del envase. [26] El uso de las capas más finas posibles de polietileno (la capa exterior tiene sólo 10 micras de espesor) minimiza el empleo de recursos. [6]

- **Tintas:** Tetra Pack usa tintas de base agua, pigmentos orgánicos y sin metales pesados.

Combinando las capas de cada material para satisfacer todas las funciones requeridas, el peso y el volumen del envase se reducen al mínimo (un envase de litro pesa solo 26 gramos), garantizando la protección del producto y la funcionalidad y comodidad para los consumidores [23].

La empresa Tetra Pack tiene varias marcas donde combina la relación polietileno-cartón-aluminio-polietileno, que son los envases de interés para este proyecto.

2.1.1.2 CICLO DE VIDA DEL ENVASE TETRA PACK

El ciclo de vida del envase tetra pack se desarrolla en las siguientes etapas: diseño del envase, selección de materias primas, transporte de materias primas, proceso productivo, llenado de alimentos, distribución del producto lleno, almacenamiento y consumo en el hogar, aprovechamiento y reciclaje del envase. [27] Siendo esta última etapa, el reciclaje de este envase, lo importante del proyecto, ya que en México no existe ningún proceso que recupere los 3 materiales que conforman este envase, volviéndose un problema cada vez mayor. [28]

2.1.2 CELULOSA

Por término medio el 75-80% de un cartón para bebidas es cartón (en peso) [24]. La celulosa, en términos generales se puede definir como un

polisacárido. Es el compuesto orgánico más difundido en la naturaleza; componente principal de las paredes celulares vegetales en las cuales se encuentra junto con hemicelulosa, pectina, extensina (que actúan como aglutinante entre las fibras celulósicas) y lignina. La que se obtiene de la madera es la pasta de celulosa [29].

La unidad básica de la celulosa es la D-glucosa que se enlaza sucesivamente a través de un enlace glucosídico en la configuración β (1-4), dando lugar a la unidad de celobiosa que es la unidad más pequeña que se repite exactamente en la cadena polimérica, ver figura 3 [29].

La celulosa es el nombre genérico para definir un amplio rango de productos compuestos por fibras naturales, contenido principalmente en árboles y otras plantas. Los árboles producen más del 90% de la celulosa a nivel mundial; el resto de las fibras son aportadas por otras fibras como pastos, bambúes, bagazos, algodones, linos, cáñamos...etc [30].

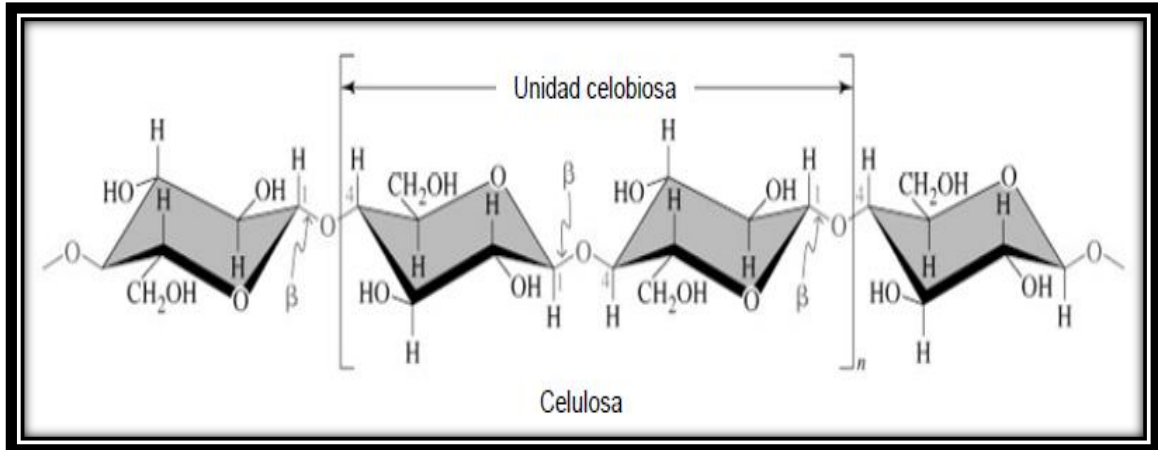


Figura 3. Unidad celobiosa de la cadena de celulosa. [29]

Las propiedades inherentes a la celulosa la convierten en un elemento fundamental en la elaboración de envases multilaminados ya que les confiere estanqueidad o consolidación en la conformación de distintos tipos de envases [23].

En la figura 4, se muestra el espectro de la celulosa por medio del análisis de espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier, donde se muestran los grupos funcionales de este polímero. [31] Este análisis es muy importante, ya que se requiere mantener la misma estructura después de un proceso de reciclado para continuar con el proceso de blanqueo convencional, si la estructura cambiara, sería posible que el proceso de blanqueo no fuera efectivo.

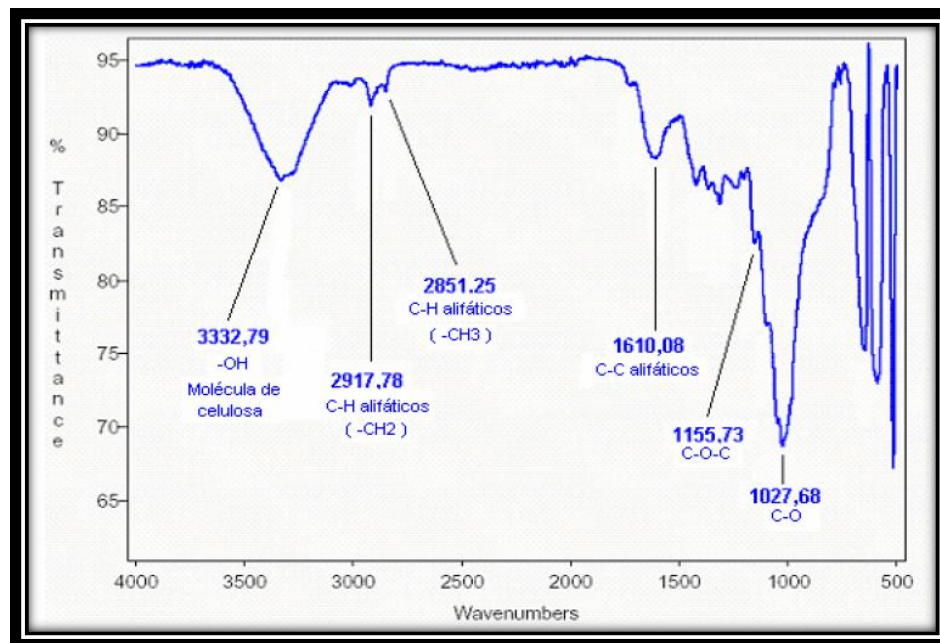


Figura 4. Espectro FTIR de la celulosa [31]

2.1.3 POLIETILENO

Por término medio, el polietileno representa el 15-20% del peso del cartón para bebidas. El polietileno proporciona estanqueidad al contenido líquido y mantiene unidos los diferentes materiales del envase. El uso de las capas más finas posibles de polietileno (la capa exterior tiene sólo 12 micras de espesor) minimiza el empleo de recursos [32].

A partir de la polimerización de etileno se pueden obtener productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental la cual se muestra en la figura 5, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado. Este tipo de polímero se sintetizó para fines como aislamiento eléctrico, pero después ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película anticorrosiva y protectora, así como para envases. [33]

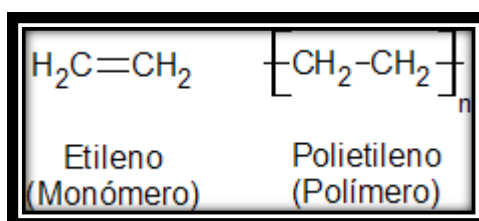


Figura 5. Estructura general de etileno y polietileno [33]

En general hay dos tipos de polietileno: de baja densidad (LDPE) y alta densidad (HDPE). Nos centraremos en el polietileno de baja densidad, ya que es el utilizado para la elaboración de los envases multilaminados [34].

El de baja densidad tiene una estructura de cadena ramificada. El polietileno de baja densidad fue producido comercialmente por primera vez en el Reino Unido en 1939 mediante reactores autoclave, necesitando presiones de 14.500 psi (100 Mpa) y una temperatura de unos 300 °C. La estructura de este polietileno le confieren propiedades estructurales aislantes, que son invaluable en la elaboración de envases multilaminado. [34]

2.1.4 ALUMINIO

Cuando se usa, la hoja de aluminio sólo representa un máximo del 5% del peso del cartón para bebidas. El envase aséptico (de larga duración) necesita una barrera extremadamente eficaz contra el oxígeno. [28] La hoja de aluminio es una solución muy práctica para esta necesidad. La hoja de aluminio

permite el almacenamiento seguro a temperatura ambiente de los productos envasados y así ahorra la energía que sería necesaria para su refrigeración tanto en el transporte como en el almacenamiento. La hoja de aluminio es una excelente barrera a pesar de su delgadez. El espesor de la hoja se ha reducido de 9 hasta 6,5 μm en los últimos 15 años. [26]

2.2 PROCESOS DE SEPARACIÓN

A continuación se define cada uno de los procesos utilizados para la separación de las capas que constituyen este envase multilaminado.

2.2.1 SEPARACIÓN POR HIDROPULPEO

El hidropulpeo es un método de reciclaje de los envases multilaminados donde se separan el aluminio y el polietileno PE del cartón (el cual acaba en forma de pasta). De este modo el hidropulpeo se emplea para formar nuevos productos de papel a partir del cartón de los envases. [35]

El proceso comienza con la llegada de los fardos envases al centro de reciclaje. Posteriormente, los envases son trasladados al hidropulper que se encargará de separar el cartón del resto de componentes. [35] El Hidropulper es como una licuadora gigante dotado de: depósito principal, hélice y sistema de cribado o sistema de filtración (no en todos los casos) [36].

El depósito del hidropulper se llena de agua y envases, que llegan mediante una cinta transportadora, además de una cantidad controlada de lejía de sosa (hidróxido de Sodio en gran parte) [37]. Entonces, la hélice comienza a girar impulsada por un motor eléctrico y de este modo se agita la mezcla durante unos 30-45 minutos hasta que se separa el cartón del polietileno y el aluminio, la hélice no solo agita la mezcla sino que también tritura en gran parte los envases. Además, el hidropulper tiene unos sensores, con los cuales es

posible determinar la consistencia de la mezcla y de este modo se puede añadir agua para diluirla o material para espesarla hasta llegar a la consistencia óptima. Se debe controlar muy bien cuál es el material que entra en el depósito ya que las impurezas podrían causar daños en las cuchillas de la hélice. [26]

Una vez que tenemos la pasta adecuada, se filtra el contenido dejando pasar el agua y las fibras de papel y reteniendo el polietileno y el aluminio. Después se somete a cribado a la pasta de papel para obtener dos divisiones, división fina y división gruesa. Por último, la pasta se estira y se enfría para formar bobinas de papel que a su vez servirán para formar nuevos productos de papel como cartón, bolsas, sacos de papel y hueveras. [38]

En algunos casos podemos encontrar un hidropulper de baja densidad, el cual incorpora el sistema de cribado que permite realizar la separación y el cribado en una misma operación. [39]

2.2.2 SISTEMA DE SEPARACIÓN CON EMISIÓN TÉRMICA

La transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura contribuye a la transferencia de calor. [40]

Este tipo de transferencia de calor ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando éstos tienen diferentes temperaturas. Y se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo, en convección forzada y convección libre.

En este trabajo nos abocaremos a la convección forzada, tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad (v), sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_s mayor o menor que la

del fluido T_f , como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura. [41]

El flujo de convección forzada puede ser laminar o turbulento, e involucrar cambios de fase tales como cuando un fluido está calentándose. La velocidad viene impuesta al sistema con una bomba o ventilador.

Como ejemplo, se considera el uso de una pistola de aire para proporcionar calentamiento por el flujo del aire mediante convección forzada de una superficie a secar, como lo muestra la figura 6.



Figura 6. Transferencia de calor por convección forzada [40]

2.2.3 SISTEMA DE SEPARACIÓN CON MICROONDAS

La radiación de microondas es un método alternativo para dar energía térmica a una reacción. La calefacción dieléctrica mediante microondas utiliza la posibilidad que tienen algunos sólidos o líquidos para transformar la energía electromagnética en calor. Este modo de convertir energía in situ tiene muchos atractivos en química ya que su magnitud depende de las propiedades de las moléculas por lo que puede utilizarse para introducir una cierta selectividad. [42]

Con la radiación de microondas la transferencia de energía no se produce por convección o conducción como en la calefacción convencional,

sino por pérdidas dieléctricas. La propensión de una muestra a calentarse mediante microondas depende de sus propiedades dieléctricas, el factor de pérdida dieléctrica y la constante dieléctrica. [41]

La línea de transmisión de interés es la guía de onda, la cual consiste en un tubo o caja de metal hueco a través del cual la onda electromagnética puede viajar desde la fuente, el magnetrón, hasta la muestra. El magnetrón emite radiación electromagnética en el rango de microondas [42].

La energía de microondas se deposita directamente sobre la muestra calentada, por lo tanto el interior del objeto puede calentarse sin mediación de calefacción conductiva y generalmente las temperaturas en el interior del objeto suele ser superior a la de la superficie. Por esto la calefacción con microondas es una calefacción volumétrica ya que se calienta el volumen del material y no la superficie. Las ecuaciones de Maxwell son de vital importancia ya que de estas surgen los fundamentos y parámetros para estudiar la propagación de las ondas electromagnéticas, en este caso, las microondas. [42]

Puede considerarse una técnica benigna con el medio ambiente. Muchos sólidos térmicamente aislantes absorben eficientemente la radiación por lo que pueden diseñarse reacciones en presencia de soportes reciclables como arcillas, zeolitas, alúmina, entre otras, evitando el empleo de ácidos minerales altamente contaminantes. Es una técnica adecuada para su empleo en ausencia de disolvente, por lo que la radiación se absorbe directamente por los reactivos lo que aumenta su eficacia, en disolución la radiación es absorbida por el disolvente que, a su vez, transmite la energía a los reactivos. Se evita el empleo y, por lo tanto, la posterior eliminación del disolvente. [43]

El emplear microondas implica un doble efecto; en primera instancia, de acuerdo a la naturaleza química de la muestra irradiada (constante dieléctrica), esta radiación tendrá un poder de penetración hasta cierto espesor generando un efecto secundario de un calentamiento volumétrico y es este último, el que permite calentar muestras por transferencia de calor sin exposición a esta radiación microondas.

2.2.4 SISTEMA DE SEPARACIÓN CON LASER

A causa de la facilidad con la que un laser puede ser focalizado gracias a sus propiedades ópticas y haciéndolo incidir en un material, se consigue aumentar la temperatura de una zona muy pequeña hasta que dicho material se funde y se logra una separación. [44]

Un laser puede funcionar de manera continua o pulsada, siendo esta última la más adecuada para espesores de material pequeños, ya que no dañan la superficie del material y necesitan velocidades de proceso muchos menores. Cuando se habla del modo pulsado, la potencia se entiende como potencia media y es necesario definir varios conceptos tales como [45]:

- *Frecuencia*: números de ciclos que emite el laser por segundo.
- *Periodo*: duración en segundos de cada ciclo.
- *Factor de trabajo*: duración en porcentaje del tiempo en que el laser está emitiendo con respecto al tiempo en que no lo está.

La elección del gas de proceso suele venir dada por la naturaleza del material, lo más usados son helio, argón, nitrógeno y dióxido de carbono. El uso de gases reactivos como nitrógeno y dióxido de carbono, puede formar compuestos que afecten al material. Mientras que el helio en productividad se suele descartar, ya que su molécula es tan pequeña y ligera que el aire lo desplaza. [45]

Por lo que se decidió trabajar en este proyecto con argón, ya que presenta una molécula de mayor tamaño y peso mayor, por lo que el aire no lo desplazara y su costo no es muy elevado.

Se decidió utilizar el laser de Nd: YAG (granate de itrio-aluminio dopado con neodimio) el cual es un cristal que se utiliza como un medio de acción láser para láseres de estado sólido.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Parte importante del proyecto es sin duda, la medición de las propiedades químicas de los materiales obtenidos. A continuación, se menciona cada una de las técnicas de caracterización:

3.1 FTIR (ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER)

Los espectros de los compuestos serán obtenidos en un espectrofotómetro por Transformadas de Fourier Perkin Elmer *Spectrum One* (en CICATA IPN U-A) que posee un accesorio HATR-PIKE Diamon MIRacle™.



Figura 7. FTIR Perkin Elmer Spectrum 100

Básicamente, los espectrofotómetros por Transformadas de Fourier funcionan haciendo incidir todo el espectro de longitudes de onda sobre la muestra de tal forma que la radiación transmitida se recoge como una señal de interferencias a la que se le aplica la operación matemática de Transformada de Fourier (Figura 7). [46]

3.2 DRX (DIFRACCIÓN DE RAYOS X)

Para conocer la cristalinidad y estructura de los materiales recuperados se llegara a cabo en el difractómetro de rayos X Advance D8, ubicado en CICATA Altamira (figura 8).



Figura 8. DRX

Los rayos-x son producidos cuando partículas eléctricamente cargadas, tales como electrones, con suficiente energía cinética son rápidamente desacelerados. Un tubo de rayos-x tiene integrado una fuente de electrones (filamento de tungsteno o iridio-torio) y dos electrodos metálicos. En la parte trasera del cátodo, al cual se le hace un orificio, se coloca la fuente de electrones. Si un alto voltaje, entre 10 y 60 kV, es colocado entre estos electrodos, entonces el electrón es acelerado rápidamente hacia el ánodo (blanco), donde este es golpeado por los electrones de alta velocidad. Los rayos-x son producidos en el punto del impacto y radian en todas direcciones. La mayor parte de la energía cinética de los electrones que golpean al ánodo (blanco), es convertida en calor, por lo que se calentaría bastante si no tuviera un sistema de enfriamiento por agua. Solo menos del 1% de la energía cinética electrónica total se transforma en rayos-x. [47]

3.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

Es una técnica termoanalítica en la que la diferencia de calor entre una muestra y una referencia es medida como una función de la temperatura. La muestra y la referencia son mantenidas aproximadamente a la misma temperatura a través de un experimento. El principio básico subyacente a esta técnica es que, cuando la muestra experimenta una transformación física tal como una transición de fase, se necesitará que fluya más (o menos) calor a la muestra que a la referencia para mantener ambas a la misma temperatura. El que fluya más o menos calor a la muestra depende de si el proceso es exotérmico o endotérmico. Determinando la diferencia de flujo calorífico entre la muestra y la referencia, los calorímetros DSC son capaces de medir la cantidad de calor absorbido o eliminado durante tales transiciones. La DSC puede ser utilizada también para determinar cambios de fase más sutiles tales como las transiciones vítreas. [46]



Figura 9. Calorímetro diferencial del barrido

Los análisis se obtuvieron en un Calorímetro diferencial de barrido Perkin Elmer *Pyris 1* (en CICATA IPN U-A) (Figura 9).

3.4 MEB (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO)

La microscopía electrónica de barrido permite la caracterización estructural y micro morfológica de los materiales. El microscopio electrónico forma la imagen con los electrones secundarios que se generan en la interacción de la radiación electrónica con una capa superficial y fina de la muestra mediante un proceso de rastreo. Los electrones reflejados son atraídos por un detector que proporciona las imágenes topográficas. En una micrografía SEM las áreas oscuras corresponden a las zonas de baja reflexividad y las áreas blancas a las zonas rugosas y relieves superficiales. En el SEM, el metalizado de la muestra es indispensable para conseguir la conductividad de la superficie, eliminar la electricidad estática y aumentar la reflectividad electrónica. [46]

Además, el hecho de que la observación de la muestra se haga punto a punto, permite la utilización de muestras de cualquier tamaño y forma, y da lugar a una gran profundidad de campo. Con ello, son posibles las fibras de celulosa y así verificar la irregularidad y características de la superficie. [48]



Figura 10. Microscopio Electrónico de Barrido modelo PHENOM

Los análisis son obtenidos en un microscopio electrónico de barrido modelo PHENOM, ver figura 10 (en MEXICHEM).

3.5 EED (ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA)

Permite la caracterización estructural de los materiales. Para poder estimular una respuesta medible de una muestra, un haz de electrones o fotones se apunta hacia la muestra que se quiere caracterizar. Estando en reposo, un átomo dentro de la muestra contiene electrones en estado basal, es decir, si excitar, los cuales se encuentran situados en capas concéntricas alrededor del núcleo. El haz incidente excita un electrón de una capa interna propiciando su expulsión y resultando en la formación de una vacancia de un electrón dentro de la estructura electrónica del átomo. Posteriormente, un átomo de una capa externa de más alta energía llena el hueco en la estructura electrónica del átomo y el exceso de energía de ese electrón es liberada en forma de rayos X. La liberación de rayos X genera líneas espectrales que son altamente específicas de los elementos individuales, por lo tanto la emisión de rayos X da información que puede ser analizada para caracterizar la muestra. [49]



Figura 11. Microscopio Electrónico de Barrido modelo Jeol JSM-5300

La composición química de las muestras fue analizado con un microscopio electrónico de barrido Jeol JSM-5300 equipado con un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X modelo Delta 1. En el laboratorio de microscopia electrónica del CICATA-IPN, Unidad Legaria.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

La metodología experimental que se utilizará en este proyecto se resume en la figura 12.

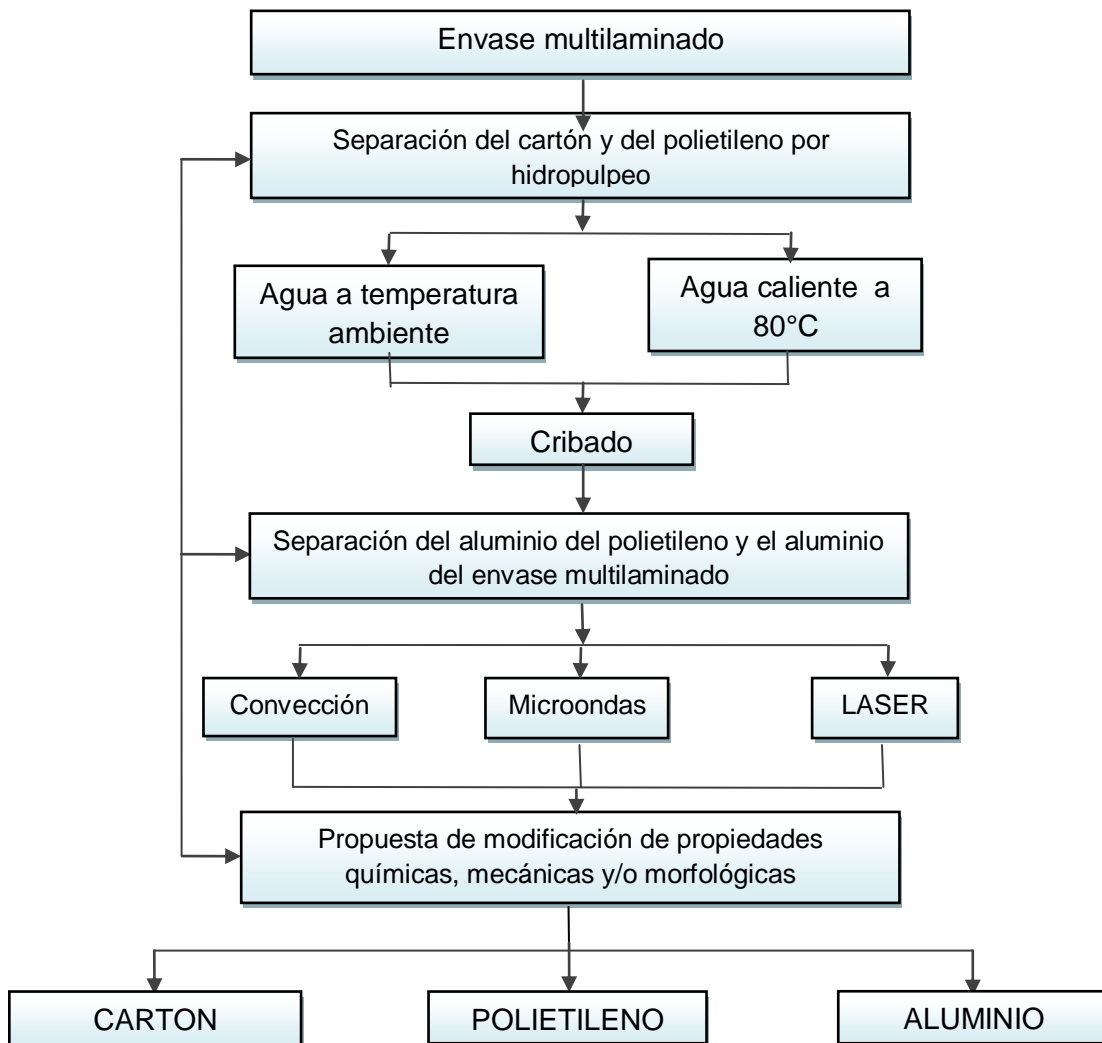


Figura 12. Diagrama de bloques del procedimiento metodológico

Los envases fueron sometidos a diferentes procedimientos para la separación de sus componentes (aluminio, polietileno y celulosa). Los

procedimientos utilizados serán en primer lugar el hidropulpeo, después la tecnología de microondas, irradiación por medio de Laser y separación por convección.

La descripción detallada de las actividades experimentales llevadas a cabo se presentan a continuación.

4.1 SEPARACIÓN POR MEDIO DE HIDROPULPEO

El objetivo de esta etapa es la separación de la capa de cartón, del envase multilaminado por medio de hidropulpeo. En la figura 13 se muestra la metodología de la experimentación llevada en esta etapa del proceso.

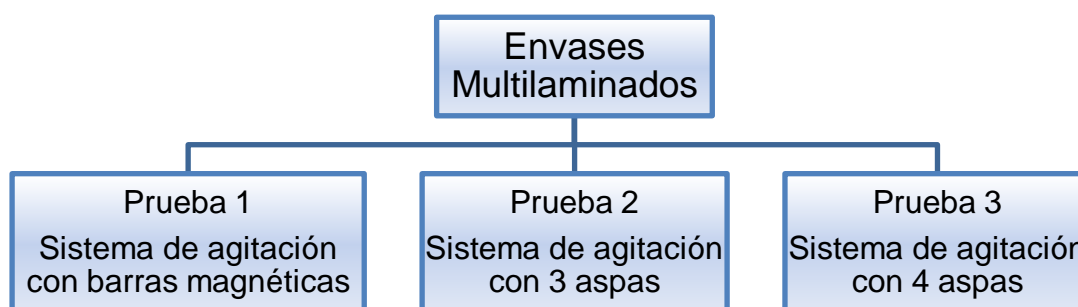


Figura 13. Diagrama de proceso de hidropulpeo

4.1.1 PRUEBA 1. SISTEMA DE AGITACIÓN CON BARRAS MAGNÉTICAS.

En esta prueba se utilizó una parrilla con agitación y 2 barras magnéticas de diferente tamaño. Se realizaron 3 experimentos manteniendo constante la temperatura y la velocidad de agitación, a 80°C y 5800rpm respectivamente. Variando la cantidad de agua en el contenedor y el tipo de barra utilizada.

Se estableció una temperatura de 80°C, ya que el polietileno comienza a reaccionar a una temperatura superior a los 90°C, para evitar alguna reacción

desfavorable, se opto por mantener una temperatura inferior. [33] Y la velocidad fue establecida debido a los parámetros de la parrilla de agitación utilizada.

En la figura 14, se muestra el sistema de agitación con las barras magnéticas.

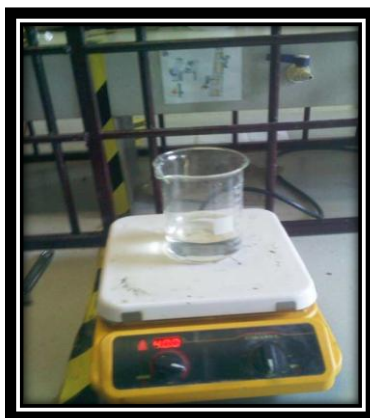


Figura 14. Sistema de agitación con barras magnéticas

En la tabla 1, se muestran los parámetros seguidos en esta prueba para llevar a cabo la separación del cartón de los envases multilaminados por medio de la agitación con barras magnéticas.

Tabla 1. Parámetros para sistema de agitación con barras magnéticas

Experimento	EM	Agua	Temperatura	Agitación
1	5gr	95ml	80°C	5800 rpm
2	5gr	250ml	80°C	5800 rpm
3	15gr	1000ml	80°C	5800 rpm

4.1.2 PRUEBA 2. SISTEMA DE AGITACIÓN CON 3 ASPAS.

En esta prueba se utilizó una parrilla, un motor marca DART, y un sistema de agitación con 3 aspas. Se realizaron 6 pruebas manteniendo constante la cantidad de agua y envases multilaminados utilizados, 250ml y 5gr respectivamente; dicha relación es un valor establecido en el proceso de hidropulpeo, es de 90-95% de agua y lo restante de envases multilaminados. Variando la temperatura de temperatura ambiente a 80°C; y variando la velocidad de agitación de 4160rpm, 5800rpm y 7500rpm.

Los valores utilizados de temperatura y velocidad de agitación, fueron para establecer una comparación entre el tiempo de separación del cartón de cada prueba y por este medio seleccionar el proceso más efectivo.

En la figura 15, se tiene el sistema de agitación con una temperatura de 80°C.



Figura 15. Sistema de agitación con 3 aspas.

En la tabla 2, se muestran los parámetros seguidos en esta prueba para llevar a cabo la separación del cartón de los envases multilaminados por medio de la agitación con 3 aspas.

Tabla 2. Parámetros para sistema de agitación con 3 aspas

Experimento	EM	Agua	Temperatura	Agitación
1	5gr	250ml	Ambiente	4160 rpm
2	5gr	250ml	80°C	4160 rpm
3	5gr	250ml	Ambiente	5800 rpm
4	5gr	250ml	80°C	5800 rpm
5	5gr	250ml	Ambiente	7500 rpm
6	5gr	250ml	80°C	7500 rpm

4.1.3 PRUEBA 3. SISTEMA DE AGITACIÓN CON 4 ASPAS.

En esta prueba se utilizó una parrilla, un motor marca DART, y un sistema de agitación con 4 aspas. Se realizaron 6 pruebas manteniendo constante la cantidad de agua y envases multilaminados utilizados, 250ml y 5gr respectivamente. Variando la temperatura de temperatura ambiente a 80°C; y variando la velocidad de agitación de 4160rpm, 5800rpm y 7500rpm.

En la figura 16, se observa el sistema de agitación con 4 aspas con temperatura ambiente y a 80°C, respectivamente.

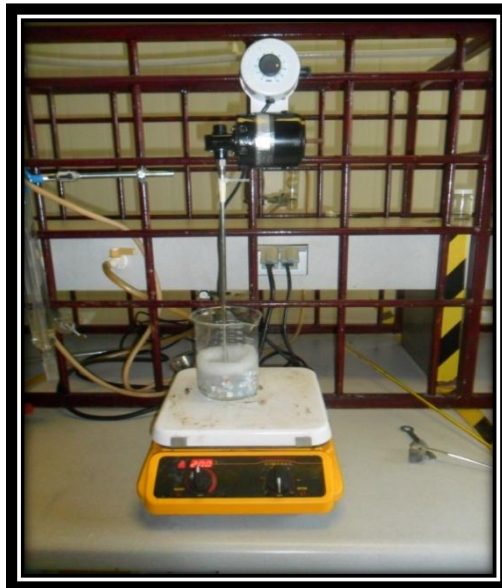


Figura 16. Sistema de agitación con 4 aspas.

En la tabla 3, se muestran los parámetros seguidos en esta prueba para llevar a cabo la separación del cartón de los envases multilaminados por medio de la agitación con 4 aspas. Estos parámetros fueron establecidos para llevar a cabo una comparación en el tiempo de separación de cada proceso y así establecer el más efectivo.

Tabla 3. Parámetros para sistema de agitación con 4 aspas

Prueba	EM	Agua	T	V
1	5gr	250ml	Ambiente	4160 rpm
2	5gr	250ml	80°C	4160 rpm
3	5gr	250ml	Ambiente	5800 rpm
4	5gr	250ml	80°C	5800 rpm
5	5gr	250ml	Ambiente	7500 rpm
6	5gr	250ml	80°C	7500 rpm

4.2 SEPARACIÓN DE POLIETILENO Y ALUMINIO

En esta etapa se llevará a cabo la separación de la película de aluminio y polietileno separado del cartón, en la etapa anterior. Se llevara a cabo por medio de 4 procesos, con la finalidad de llevar a cabo una separación efectiva con bajo costo en el proceso. En la figura 17 se muestra la metodología de la experimentación llevada en esta tercera etapa del proceso.

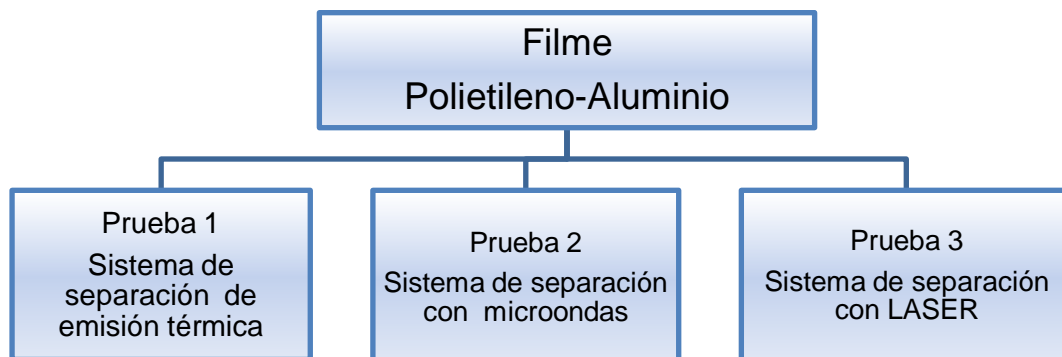


Figura 17. Diagrama de proceso de separación de polietileno y aluminio

4.2.1 PRUEBA 1. SISTEMA DE SEPARACIÓN DE EMISIÓN TÉRMICA.

En esta prueba se utilizó una pistola de aire caliente marca Black&Decker, 2 guías de cuarzo de diferentes longitudes, 32cm y 18cm, y un contenedor de acero inoxidable. Se realizaron 3 pruebas variando diferentes parámetros para lograr la separación más eficiente.

a) Sistema de emisión térmica directamente en la muestra.

En esta prueba se utilizó un soporte universal para sostener la pistola de aire caliente, la cual se enfocó al filme polietileno-aluminio (figura 18). Midiendo la temperatura con un termómetro, el cual se colocó con unas pinzas sostenidas en otro soporte universal.

Se observó el comportamiento de esta película cada minuto, por 5 minutos, manteniendo la temperatura constante a 85°C, esta temperatura se mantuvo constante para reducir la posibilidad de reacción del polietileno con el oxígeno presente en el ambiente, ya que por arriba de esa temperatura el polietileno comienza a degradarse. [33]



Figura 18. Sistema de emisión térmica directamente en la muestra.

b) Sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 18 cm de longitud.

En esta prueba se utilizó un soporte universal para sostener la guía de cuarzo, la cual se conectó de la boca de la pistola de aire al contenedor de acero inoxidable, en el cual se encontraba el filme polietileno-aluminio. Se optó por utilizar una guía de cuarzo en lugar de un vidrio común, por seguridad en el proceso, ya que el cuarzo es más resistente al calor que el vidrio.

Se realizaron 12 experimentos, variando el tiempo de exposición del filme al calor de 10min, 20min y 30min; haciendo variaciones también de la temperatura desde 90°C hasta 120°C. Estos parámetros fueron establecidos para observar el comportamiento del polietileno y así obtener la velocidad y la temperatura adecuada para la separación de las capas de polietileno y aluminio.

En la figura 19, se observa el sistema de emisión térmica, en la cual se empleo una guía de cuarzo de 18 cm de longitud.

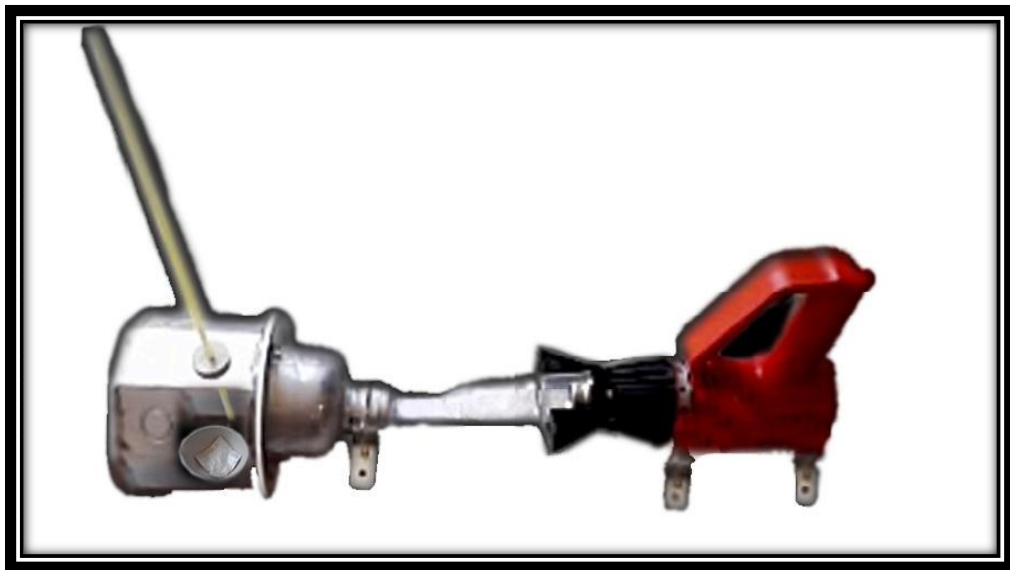


Figura 19. Sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 18cm.

En la tabla 4, se observan los parámetros establecidos para la separación de las capas de polietileno y aluminio por medio de emisión térmica utilizando una guía de cuarzo de 18 cm de longitud.

Tabla 4. Parámetros para sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 18cm

Tiempo	Temperatura
10 min	90°C
10min	100°C
10 min	110°C
10 min	120°C
20 min	90°C
20min	100°C
20 min	110°C
20 min	120°C
30 min	90°C
30min	100°C
30 min	110°C
30 min	120°C

c) Sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 32 cm de longitud.

En esta prueba se utilizó un soporte universal para sostener la guía de cuarzo, la cual se conectó de la boca de la pistola de aire al contenedor de acero inoxidable, en el cual se encontraba el filme polietileno-aluminio (figura 20).

Se realizaron 3 experimentos, variando el tiempo de exposición del filme al calor de 10min, 20min y 30min; manteniendo la temperatura constante a 85°C, para evitar alguna reacción del polietileno con el oxígeno presente en el medio.

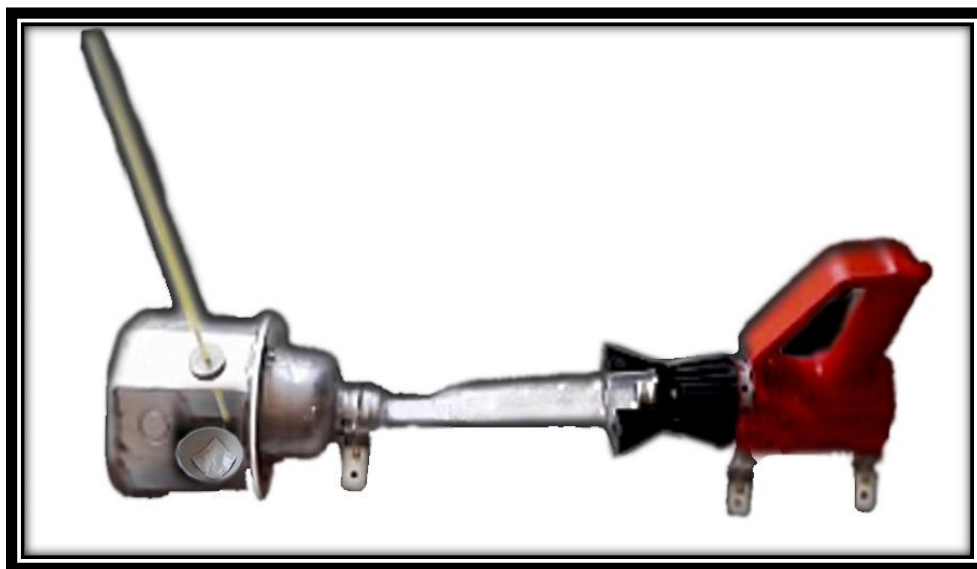


Figura 20. Sistema de emisión térmica con guía de cuarzo de 32cm.

4.2.2 PRUEBA 2. SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROONDAS.

En esta prueba se utilizó un microondas convencional de 950W y 3 contenedores refractarios de diferente composición. Se realizaron 3 pruebas variando los contenedores y el tiempo de irradiación de microondas en la muestra de polietileno-aluminio.

Como no se tienen estudios previos de este proceso de separación, los parámetros fueron establecidos comenzando con un tiempo de radiación corto (5 min.), para observar el comportamiento del filme de polietileno y aluminio. Y se vario el tiempo de radiación hasta 20 min, para establecer una comparación en el comportamiento del polietileno y así establecer el proceso de separación más efectivo.

a) Sistema de separación por microondas con contenedor refractario de arcilla.

En esta prueba se colocó la película de polietileno-aluminio, en el contenedor refractario de arcilla roja y se introdujo a la cavidad del microondas.

Se realizaron 4 experimentos, variando el tiempo de exposición del filme al calor de 5min, 10min, 15min y 20min; variando también la temperatura de 50°C, 70°C, 90°C y 100°C, observando el comportamiento del filme a diferentes temperaturas.

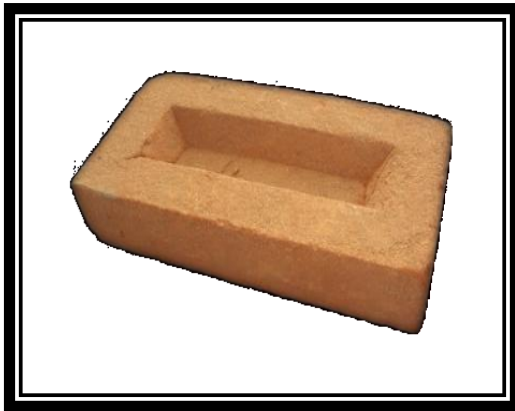


Figura 21. Contenedor refractario de arcilla roja

Tabla 5. Características del contenedor refractario. [50]

Análisis químico	%
Sílice	43
Aluminio	40
Oxido de hierro	4.5
Oxido de magnesio	4.1
Potasio	2.4
Sodio	0.5
Calcio	0.13
Titanio	0.50

En la figura 21, se observa el contenedor refractario que se utilizó en esta prueba y en la tabla 5 se muestran las características de este contenedor, mientras que en la figura 22, se puede observar el sistema de separación por microondas con el ladrillo refractario de arcilla.

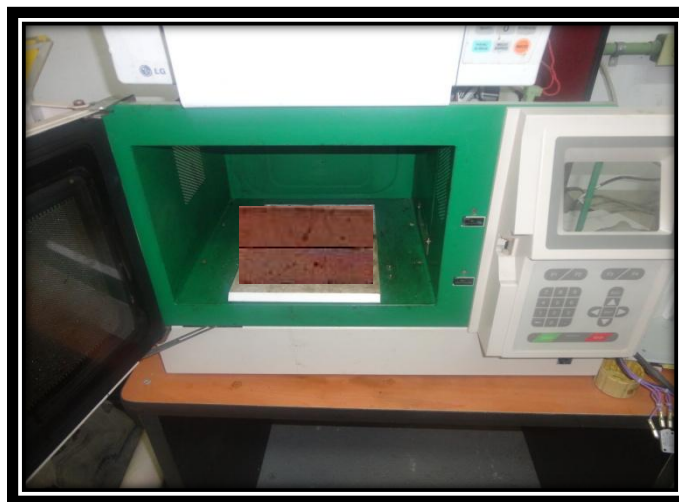


Figura 22. Sistema de separación por microondas con contenedor de arcilla.

b) Sistema de separación por microondas con contenedor refractario de alúmina.

En esta prueba se colocó el filme de polietileno-aluminio, en el contenedor refractario de alto contenido de alúmina (figura 23), en la tabla 6 se muestran las características de este contenedor y se introdujo a la cavidad del microondas (ver figura 24).



Figura 23. Contenedor refractario de alúmina.

Tabla 6. Características del contenedor refractario. [51]

Análisis químico	%
Al ₂ O ₃	39 – 42
Si O ₂	51 - 53
Fe ₂ O ₃	1.0 - 2.0
CaO	0.2 - 0.8
MgO	0.0 - 0.5
TiO ₂	1.2 - 2.2
Na ₂ O+K ₂ O	0.5 - 1.0
Propiedades Físicas	
Refractariedad ECP	32 – 33
Max. Temp. Servicio	1735 °C
Porosidad %	17 – 21
Densidad g/cm ³	2.10 – 2.17

Se realizaron 4 experimentos, variando el tiempo de exposición del filme al calor de 5min, 10min, 15min y 20min; variando también la temperatura de 90°C, 150°C, 190°C y 250°C, observando el comportamiento del filme a diferentes temperaturas.



Figura 24. Sistema de separación por microondas con contenedor de alúmina.

c) Sistema de separación por microondas con contenedor refractario de caolín y tergopor.

Para la realización de esta prueba, fue necesario hacer el contenedor refractario de caolín con tergopor (figura 25) y un contenedor de carburo de silicio con bentonita (figura 26).



Figura 25. Contenedor refractario de caolín y tergopor [52]



Figura 26. Contenedor de carburo de silicio. [52]

Para el contenedor refractario, se realizó una mezcla de 600gr de caolín, 400gr de tergopor y agua. Esta se prensó dentro de un molde de madera,

después de unos minutos se retiró del molde, y se dejó secar 1 semana, para que la mezcla fraguara. Una vez secos se procedió al cocido del contenedor en una mufla, aumentando gradualmente la temperatura (3 grados por minuto) hasta llegar a los 1000°C. Este contenedor, presenta una temperatura de fusión de 1260°C. [52]

Para el segundo contenedor se mezcló 200 grs de carburo de silicio y 15 grs de bentonita, agregando agua suficiente para dejar una pasta que permita el moldeado, se rellena un molde circular de acero y se presionó. Después de unos minutos se desmoldó y se dejó secar por un par de días. Después de un calentamiento a 1000 °C que se realizó en el mismo microondas. [52]

4.2.3 PRUEBA 3. SISTEMA DE SEPARACIÓN POR LASER.

En esta prueba se utilizó un laser de Nd:YAG que se encuentra en una longitud de onda de 1064nm (figura 27). Se colocó la muestra de polietileno-aluminio y se irradió con el laser. Se realizó la prueba en 5 puntos diferentes para observar el comportamiento de la película y poder cotejar los resultados obtenidos.

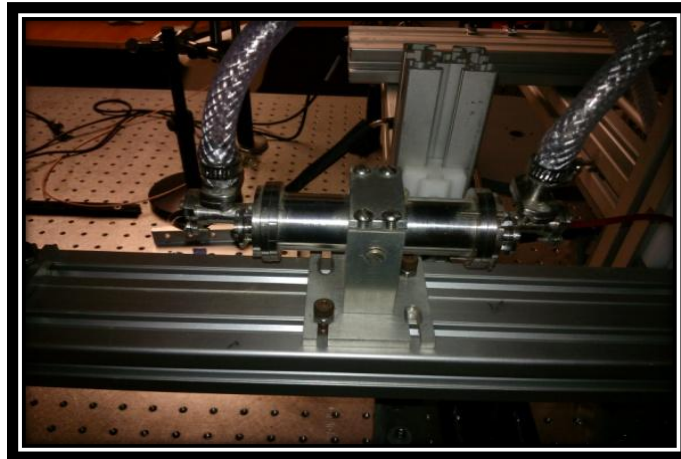


Figura 27. Sistema de separación por LASER Nd:YAG

Las 5 pruebas se realizaron con las siguientes características:

- Energía en generación libre 800 mJ.

- Duración 150 microsegundos.
- Potencia por pulso 5 kW. Esto en el área del spot del láser significa 25 kW por centímetro cuadrado.

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se explicó en un capítulo anterior, el envase multilaminado está constituido por 6 capas, intercalando cartón, polietileno y el aluminio. Debido a la falta de información sobre la forma de unión entre cada una de estas 6 capas, se recurrió a la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), la cual constituye una valiosa herramienta para profundizar en el conocimiento de la caracterización morfológica y textural, no sólo del material originario sino también de la diversidad de productos que se puedan elaborar a partir de ellos, y cuya relación con sus propiedades mecánicas, permite identificar posibilidades reales de aprovechamiento. Este estudio tiene como objetivo caracterizar la morfología y naturaleza química de los envases multilaminados mediante MEB.

El material fue caracterizado en secciones cortadas en forma de tiras de envases reciclados. El análisis por MEB en las muestras en forma de tiras corrobora la morfología típica de un material compuesto, constituido por una zona fibrosa rica adosada a una capa muy fina de Aluminio, la cual esta adherida en ambos lados por capas de polietileno (figura 28).

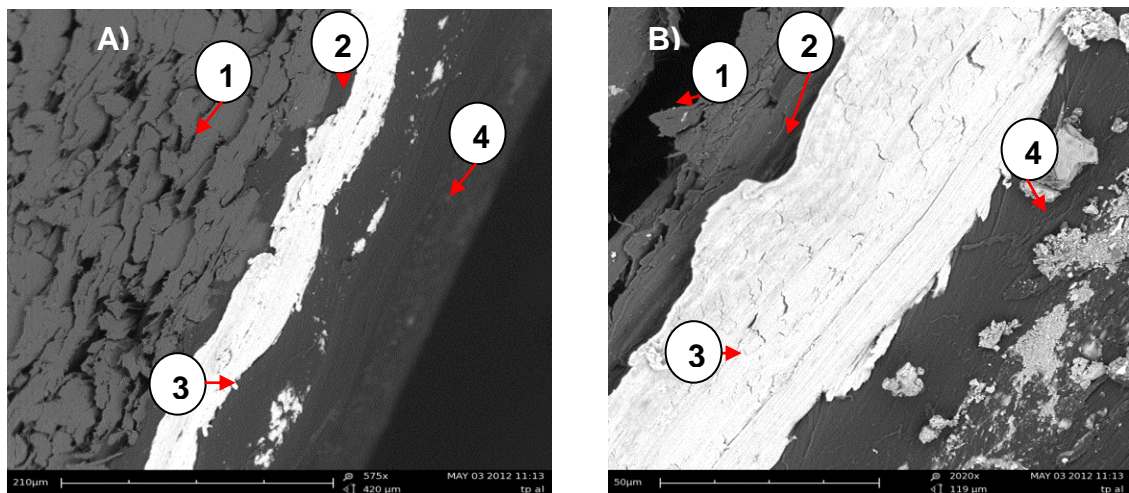


Figura 28. Micrografía por MEB del envase multilaminado, donde se muestra la unión de 5 capas que conforman este envase.

En la figura 28, se puede observar que la manera en la que están adheridas 5 de las 6 capas que constituyen al envase multilaminado es simplemente por compatibilidad física, siendo estas:

1.- Se observa la zona estratificada que corresponde al cartón, es el material principal, el cual le proporciona rigidez y resistencia. En promedio representa del 75 al 80% del peso del envase multilaminado.

2.- Se observa una capa muy fina correspondiente al polietileno el cual es un polímero sintético y sirve de cómo adherente entre la capa de cartón y el aluminio.

3.- Se observa color claro la capa de aluminio, es una hoja delgada que representa el 5% del peso del envase. En los últimos 15 años su espesor se ha reducido, de 9 a 6.5 μ . Este material sólo está presente en envases destinados a productos de larga duración; que requieren una barrera eficaz que impida el paso de oxígeno y la luz, necesidad que es solventada por esta hoja metálica

4.- Por último se observan las 2 capas de polietileno adheridas. Estas capas representan entre 15 y 20% del peso total del envase. Se utilizan capas sumamente delgadas que desempeñan la función de impermeabilizante interno y evita el contacto del alimento con el aluminio.

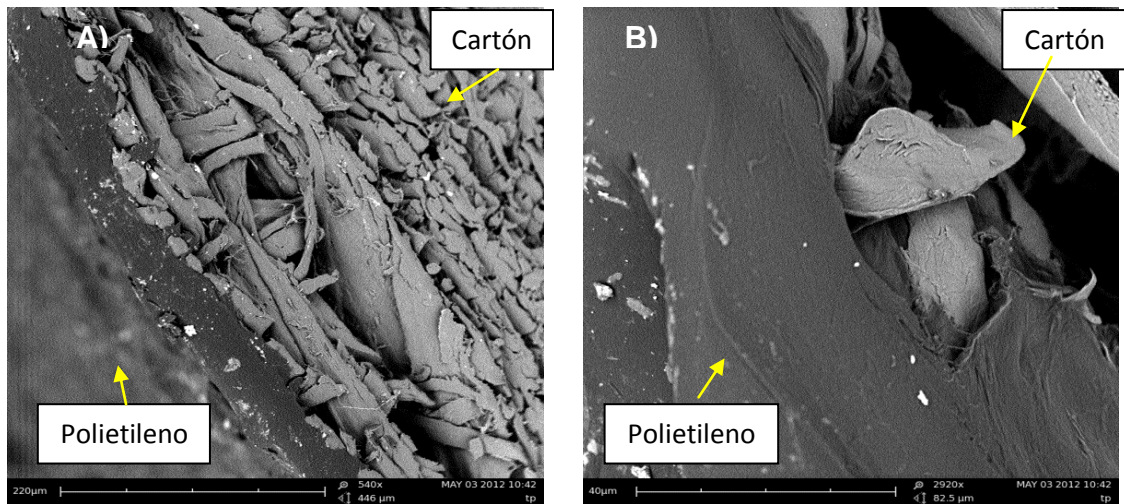


Figura 29. Micrografía por MEB del envase multilaminado, donde se muestra la unión de la capa de cartón con la capa de polietileno.

En la figura 29, se puede observar con mayor claridad la adherencia entre las capas de cartón y polietileno. En la figura 29B se puede observar con mayor claridad el mecanismo de adherencia entre las capas de cartón y polietileno. Se observa que el polietileno para unirse con el cartón, se introduce en las fibras de celulosa, esto es porque la unión de las capas se realiza a 310°C en la que el polietileno hace la función de un adhesivo, lo que permite que este se introduzca en las fibras de celulosa y al momento de enfriarse, el polietileno adquiere su estado sólido y esto ocasiona la consolidación del envase multilaminado.

5.1 SEPARACIÓN POR MEDIO DE HIDROPULPEO

A partir de la literatura revisada las capas a retirar del envase para dejar libre el conjunto p-p-a-p y poder trabajar con él, son la capa externa de polietileno y la capa de cartón proveniente de la celulosa.

Para esto se recurrió a 3 métodos para dicha separación, a continuación se presentan los resultados.

- **Prueba 1. Sistema de agitación con barras magnéticas.**

En la figura 30 se observa la pulpa desprendida de la lámina de polietileno y aluminio después de la etapa de hidropulpeo, mientras que en la figura 31 se tiene la pulpa en la etapa de cribado.



Figura 30. Pulpa después de hidropulpeo.



Figura 31. Cribado de la pulpa separada del envase multilaminado.

En la tabla 7 se muestran los parámetros, los cuales son la cantidad en gramos de envase utilizado, la cantidad de agua, la temperatura, la velocidad y tiempo del proceso, así como los resultados que se obtuvieron en esta prueba, los cuales son la cantidad de pulpa recuperada en gramos y porcentaje. Dando el mejor resultado la prueba en la que se agito por 90 minutos a 80°C, ya que en esta se recuperó mayor porcentaje de pulpa con menos gasto de agua para la agitación.

Tabla 7. Parámetros y resultados del sistema de agitación con barras magnéticas

Prueba	EM	Agua	T	V	t	Pulpa	%
1	5gr	95ml	80°C	5800 rpm	60min	3.109	82 %
2	5gr	250ml	80°C	5800 rpm	90 min	3.597	95%
3	15gr	1000ml	90°C	5800 rpm	120 min	6.392	56%

- **Prueba 2. Sistema de agitación con 3 aspas.**

En la figura 32 se tiene la pulpa aun mezclada con agua y la capa de aluminio y polietileno, mientras que en la figura 33 se muestra la pulpa en la etapa de cribado.



Figura 32. Pulpa después de hidropulpeo.



Figura 33. Cribado de la pulpa separada del envase multilaminado.

En la tabla 8 se muestran los parámetros y los resultados que se obtuvieron en esta prueba, en donde se recurrió al sistema de agitación con 3 aspas.

Dando el mejor resultado la prueba en la que se agito por 20 minutos a 80°C a una velocidad de 7500rpm, ya que en esta se recupero el 97% de la pulpa, lo equivalente a 3.67gr de los 5gr de envases multilaminados.

Tabla 8. Parámetros y resultados del sistema de agitación de 3 aspas.

Prueba	V	T	EM	Agua	T	Pulpa	%
1	4160 rpm	Ambiente	5gr	250ml	130min	3.247	86%
2	4160 rpm	80°C	5gr	250ml	70min	3.560	94%
3	5800 rpm	Ambiente	5gr	250ml	100min	3.440	91%
4	5800 rpm	80°C	5gr	250ml	40min	3.495	93%
5	7500 rpm	Ambiente	5gr	250ml	55min	3.452	92%
6	7500 rpm	80°C	5gr	250ml	20min	3.670	97%

- **Prueba 3. Sistema de agitación con 4 aspas.**

En la figura 34 se muestra la pulpa mezclada con agua y la capa de aluminio y polietileno, en la etapa de hidropulpeo. En la figura 35 se observa la pulpa en la etapa de cribado.



Figura 34. Pulpa después de hidropulpeo.



Figura 35. Cribado de la pulpa separada del envase multilaminado.

En la tabla 9 se muestran los parámetros y los resultados que se obtuvieron en esta prueba, en donde se recurrió al sistema de agitación con 4 aspas.

Dando el mejor resultado la prueba en la que se agito por 15 minutos a 80°C a una velocidad de 7500rpm, ya que en esta se recupero el 95% de la pulpa, lo equivalente a 3.581gr de los 5gr de envases multilaminados.

Tabla 9. Parámetros y resultados del sistema de agitación de 4 aspas.

Prueba	V	T	EM	Agua	t	Pulpa	%
1	4160 rpm	Ambiente	5gr	250ml	120min	3.176	84%
2	4160 rpm	80°C	5gr	250ml	65min	3.451	92%
3	5800 rpm	Ambiente	5gr	250ml	90min	3.235	86%
4	5800 rpm	80°C	5gr	250ml	30min	3.493	93%
5	7500 rpm	Ambiente	5gr	250ml	45min	3.308	88%
6	7500 rpm	80°C	5gr	250ml	15min	3.581	95%

Observando los resultados obtenidos en cada prueba, se concluye que el proceso de separación de la pulpa, fue efectivo con el sistema de agitación de 4 aspas a una velocidad de agitación de 7500rpm a una temperatura de 80°C, ya que se reduce el tiempo de separación de 40 minutos a 15 minutos, además de obtener un porcentaje alto (95%) en la recuperación de la pulpa sin la adición de ningún compuesto para dicha separación.

Esto es porque a esa temperatura la capa de polietileno que cubre el papel, se ablanda y se tiene una mayor área de contacto en el papel, lo que provoca que se humedezca más rápido y se separen de la película de polietileno y aluminio.

- **FTIR (Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier)**

Aunque en la etapa de hidropulpeo no se añadió ningún compuesto para la separación de las fibras de celulosa del conjunto de polietileno-aluminio-

polietileno-polietileno, se realizo la separación a una temperatura de 80°C, por lo que es importante comprobar que no hubo ningún cambio en su estructura ya que es necesario mantener la estructura para que no modifique las propiedades de la celulosa, se analizo por medio de FTIR.

En la tabla 10 se muestran las longitudes de onda donde se encuentran las principales bandas de absorción de una hoja de papel con características similares a la utilizada en la elaboración del EM.

Tabla 10. Asignación de las bandas de absorción de FTIR de la hoja. [31]

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Identificación
3332	Absorción de los grupo –OH de la celulosa
2917	C-H alifáticos vibración asimétrica "stretching"
2851	C-H alifáticos vibración simétrica "stretching"
1610	C-C alifático
1155	C-O-C vibración "stretching"
1027	C-O vibración "stretching"

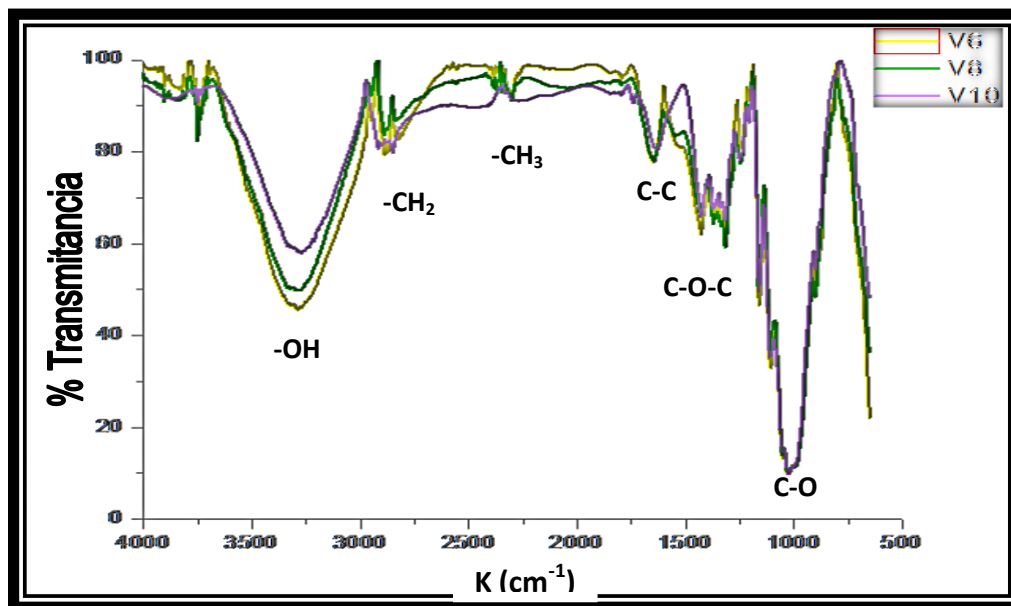


Figura 36. Espectro de las fibras de papel reciclado de los envases multilaminados en sistema de agitación de 4 aspas.

La figura 36 muestra el espectro de las fibras de la pulpa reciclada del envase multilaminado y se puede comprobar que la estructura de la celulosa no se alteró. Se mantuvieron las mismas bandas de absorción en los rangos de las longitudes de onda mostradas en la tabla 10.

Se observa, en el rango de 3000 a 3500 cm^{-1} , se pronuncia el pico correspondiente al (-OH) más en la muestra V6 y V8, esto se debe a que la fibra de celulosa aún contenía agua, lo que se comprobó secando la fibra en la estufa por 30 minutos a 60°C, y volviendo a realizar el análisis de FTIR.

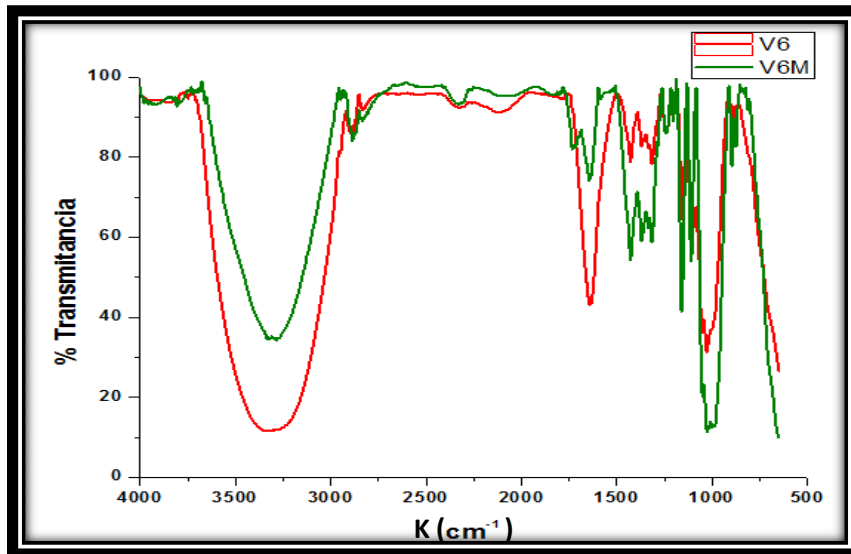


Figura 37. Comparación de los espectros de las fibras de papel reciclado de los EM, antes y después del segundo calentamiento.

Al volver a calentar la muestra de V6, se evapora el agua que aún contenía, por lo tanto se redujo el pico correspondiente a el rango de 3000 a 3500 cm^{-1} , como se observa en la figura 37, donde se tiene la comparación del espectro antes y después del calentamiento.

Lo mismo ocurre en la muestra V8, en la figura 38 se tiene el espectro que se obtuvo en los análisis en la muestra, antes y después del segundo calentamiento a 30°C, notando una reducción en el mismo rango del OH.

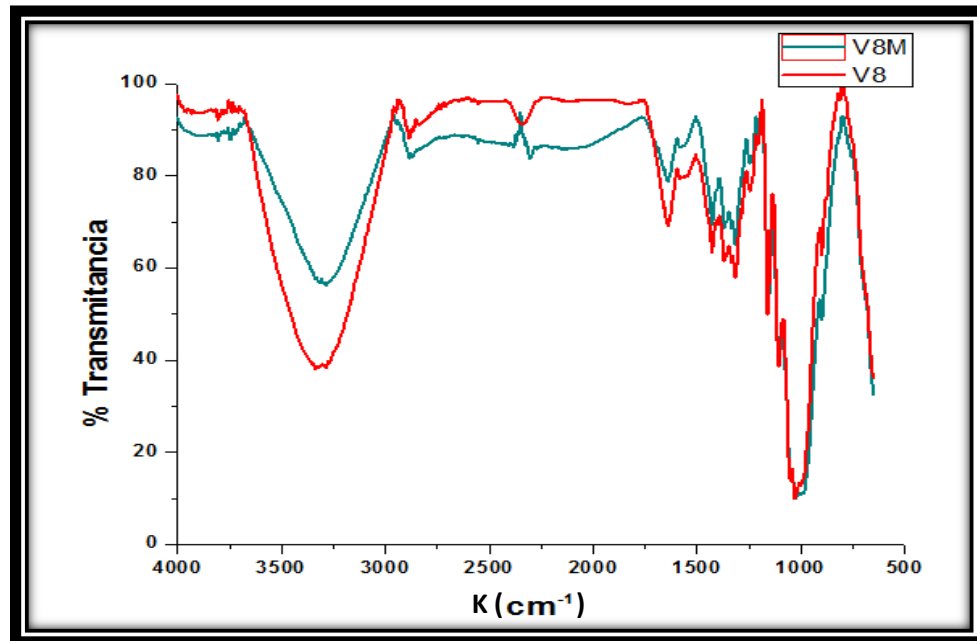


Figura 38. Comparación de los espectros de las fibras de papel reciclado de los EM, antes y después del segundo calentamiento.

- **DSC (Calorimetría diferencial de barrido)**

Ya que todos los materiales se comportan frente al calor de una manera determinada de acuerdo a sus características y propiedades, se realizó el análisis de calorimetría diferencial de barrido. Ya que es de suma importancia el ver que las fibras no sean deterioradas o se destruyan por efecto del calor, ya que las propiedades de estas fibras para la formación de papel reciclado disminuirían considerablemente.

En la figura 39 se tiene el termograma de la referencia analizado por calorimetría diferencial de barrido, este análisis se llevó a cabo para poder efectuar una comparación con los espectros de celulosa que fueron sometidos a una separación con una temperatura de 80°C, y así confirmar que estas fibras no tuvieron ningún cambio en su composición.

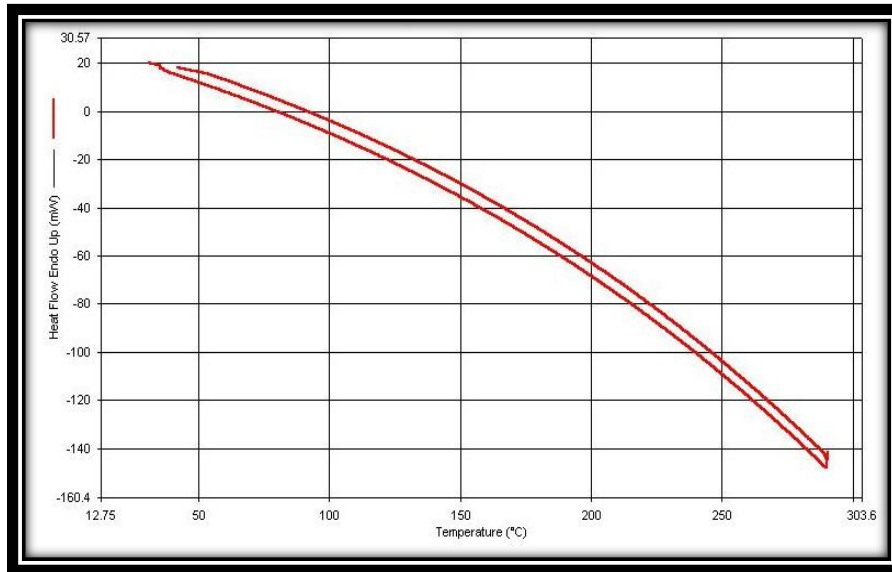


Figura 39. Termograma de referencia con calorimetría diferencial de barrido

Se realizó este análisis a las fibras que se obtuvieron con los mejores resultados, las cuales fueron las fibras separadas con el sistema de agitación con 3 aspas a una velocidad de 7500rpm, a una temperatura de 80°C y a las fibras obtenidas con el sistema de agitación de 4 aspas a una velocidad de 7500rpm a una temperatura de 80°C.

En la figura 40, se muestra el termograma obtenido de las fibras al analizarlas, en donde se puede observar que en el rango de 50 a 100°C se tuvo una transición temporal, debido a la evaporación de humedad que aun contenían las fibras, eso se pudo confirmar en la línea de regreso, en la cual no mostró modificación.

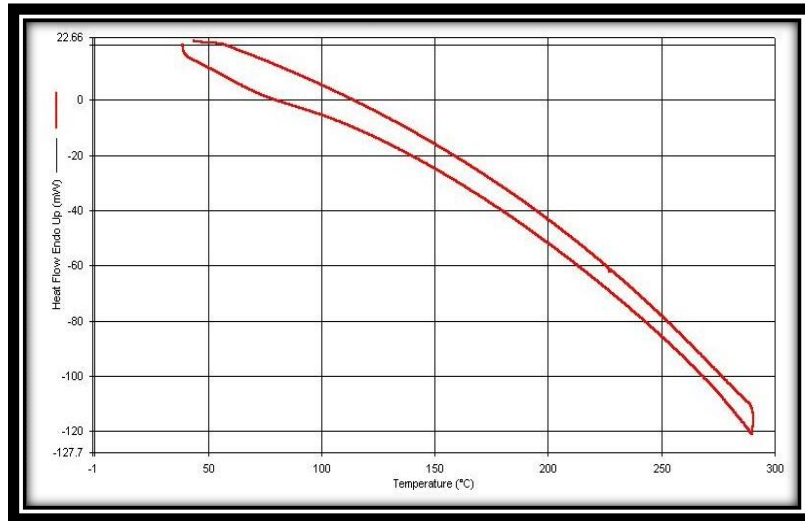


Figura 40. Termograma de las fibras con calorimetría diferencial de barrido

En la figura 41 se apreció algo similar a la figura 42, se tuvo un cambio de fase en un rango de 50 a 100°C, también debido a la humedad que contenía la muestra, esto fue confirmado en la misma grafica, en la línea de regreso no se observa ningún cambio.

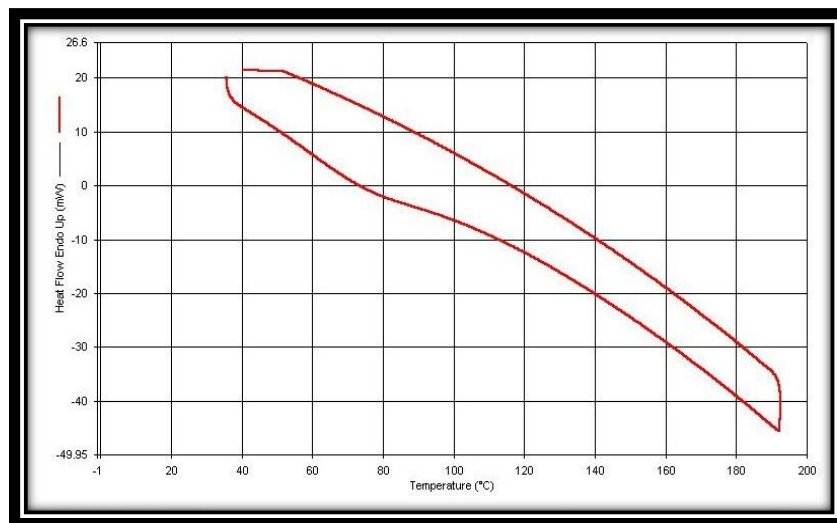


Figura 41. Termograma de las fibras con calorimetría diferencial de barrido

Y por lo tanto, mediante el análisis de calorimetría diferencial de barrido se puede observar que no existe ningún cambio en las fibras que modifique sus características químicas y físicas.

- **SEM (Microscopía electrónica de barrido)**

Esta técnica permite la caracterización estructural y micro morfológica de los materiales. Se analizaron 3 muestras, la primera fue la celulosa obtenida en el sistema de agitación de barras magnéticas a 5800rpm, la segunda fue la celulosa obtenida por medio del sistema de agitación de 3 aspas a 80°C y 7500rpm y la tercera, la celulosa obtenida por el sistema de agitación de 4 aspas a 80°C y 7500rpm. De esta manera fue posible examinar las fibras de celulosa y así verificar la morfología de estas.

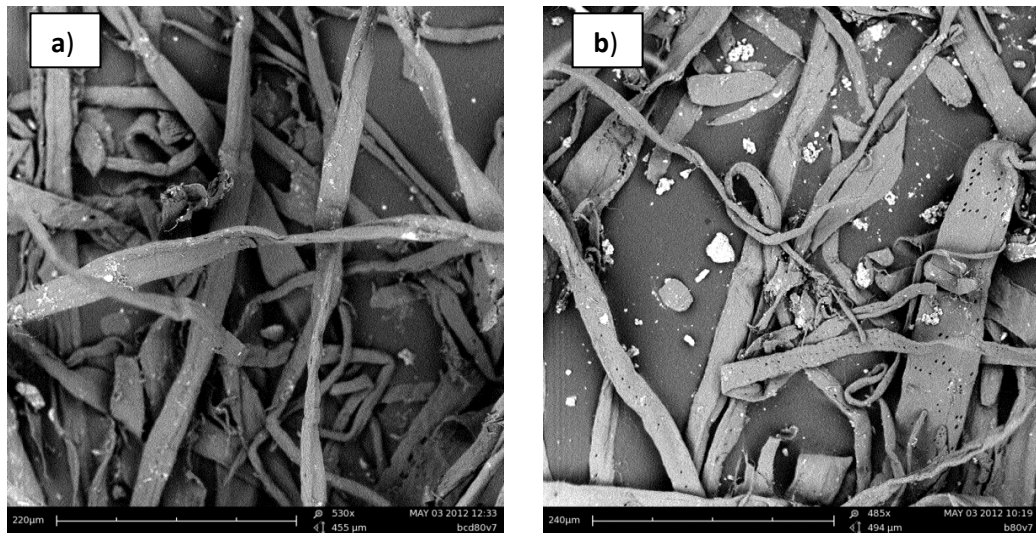


Figura 42. Micrografías de fibras de celulosa, obtenidas en sistema de agitación con barras magnéticas.

En las figuras 42 a y b, se observan las micrografías de las fibras de celulosa obtenidas en el sistema de agitación de barras magnéticas, la cuales son fibras planas y son consideradas como fibras largas, también en la figura 42B, se observan impurezas, las cuales fueron analizadas por espectroscopia de energía dispersiva para conocer la composición de estas.

En las figuras 43, se muestran las micrografías de las fibras obtenidas por el sistema de agitación de 3 aspas. En estas fibras se presentan puntuaciones aureoladas las cuales son propias de los tejidos de conducción de la celulosa utilizada en la elaboración de los envases multilaminados.

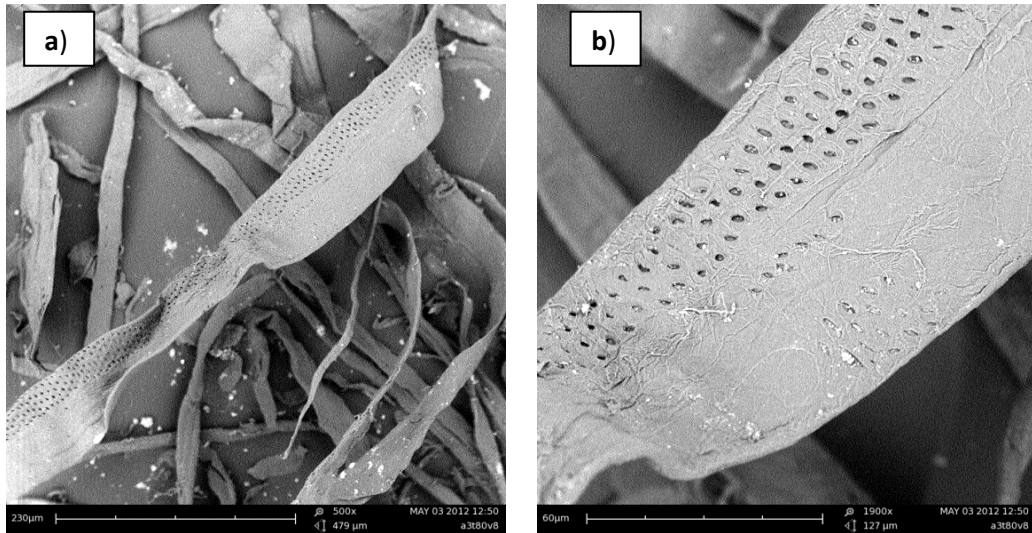


Figura 43. Micrografías de fibras de celulosa, obtenidas en sistema de agitación con 3 aspas.

También se analizaron las fibras de celulosa obtenidas por el sistema de agitación de 4 aspas, las cuales se muestran en las figuras 44 a y b. En la figura 44, se observa también la presencia de puntuaciones aureoladas así como impurezas, en la figura 44b, se observa que las fibras son fibras planas.

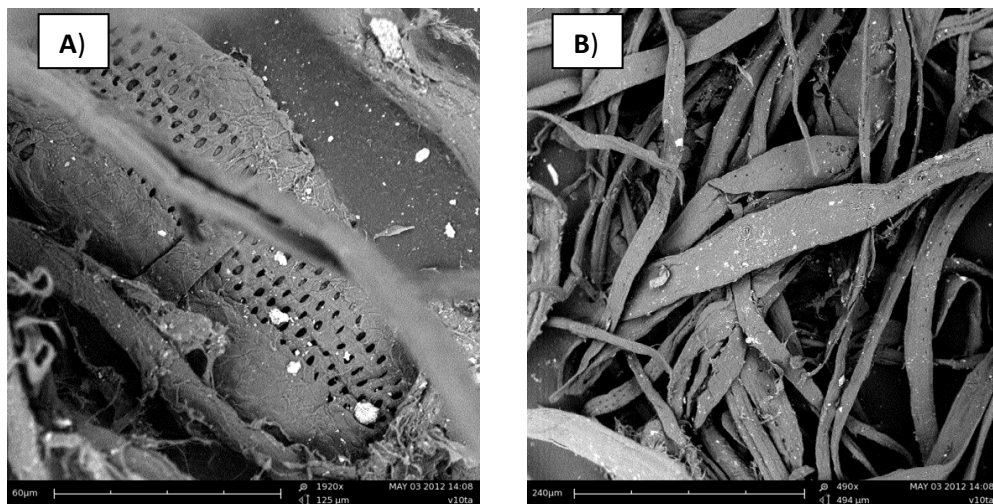


Figura 44. Micrografías de fibras de celulosa, obtenidas en sistema de agitación con 4 aspas.

Como resultado de este análisis se observó que las fibras que se obtuvieron de los sistemas de agitación con barras magnéticas y 3 aspas son de mayor longitud con respecto a las fibras obtenidas con el sistema de agitación de 4 aspas, ya que estas últimas presentan una mayor superficie de contacto, lo que permite una mayor fragmentación de las fibras.

También se pudieron observar en diversas micrografías la presencia de secuencias de areolas (ver figura 42b, 43a y b, 44a), que por medio de bibliografía se pudo comprobar que esto es consecuencia de la materia prima (madera de coníferas) de donde es extraída. La celulosa que se emplea para la elaboración de los rollos laminados con los que se elaboran los envases multilaminados, provienen de madera obtenida de pinos las que principalmente están constituidas por puntuaciones aureoladas, que son válvulas que regulan la concentración y la presión entre las células y poseen una membrana denominada torus que a su vez posee microporos. Las puntuaciones aureoladas son propias de los tejidos de conducción. [53]

También se observaron impurezas de gran tamaño, como se muestra en la figura 45, la cuales fueron analizadas por medio de espectroscopia de energía dispersiva para determinar la naturaleza química de estas.

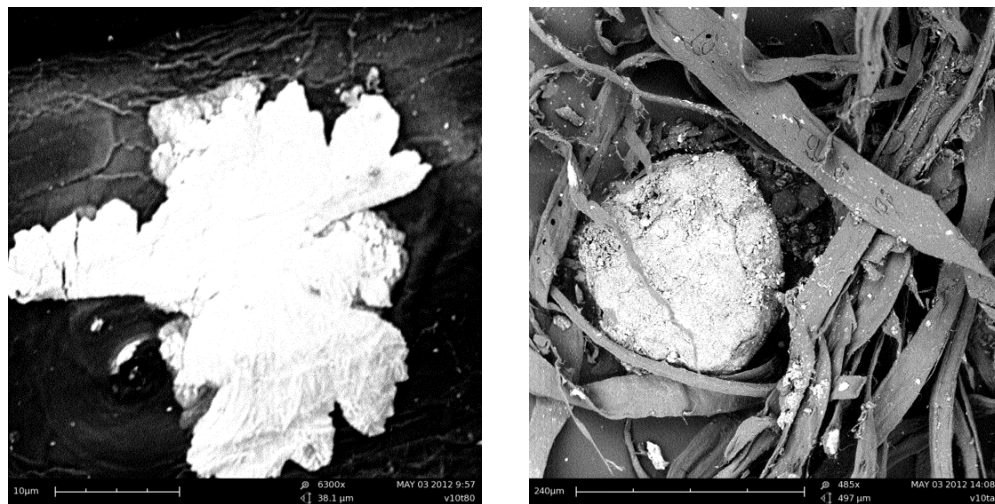


Figura 45. Impurezas en fibras de celulosa recuperadas.

- **ESD (Espectroscopia de energía dispersiva)**

Se analizaron 3 muestras de la pulpa obtenida para obtener la composición química de esta. Los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de EDS para las 3 muestras analizadas.

Elemento	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
	Peso%	Peso%	Peso%
C	27.84	39.60	43.55
O	63.35	54.13	55.36
Na	-----	0.63	-----
Mg	0.23	0.51	-----
Al	3.17	0.16	0.09
Si	2.78	0.24	0.08
Ca	2.63	2.93	0.24
Cl	-----	0.27	-----
S	-----	1.53	0.03
Total	100.00	100.00	100.00

Con base a la tabla 11 podemos observar que la composición de las muestras de celulosa obtenida no es muy variable.

Se presenta en mayor cantidad el carbono y el oxígeno, ya que estos son los elementos base de la celulosa.

Además se tienen otros elementos debido a los aditivos utilizados en el proceso de fabricación del papel, como son los agentes de destintado, entre los que utilizan: Hidróxido sódico, silicato sódico, peróxidos, entre otros. Junto con estos aditivos se incorporan otros como son las cargas y pigmentos, en los que se utilizan: caolín, carbonato cálcico, dióxido de titanio, alúmina y silicatos. [54] [55]

También cabe destacar los contaminantes presentes en el agua de alimentación utilizada en la separación de la celulosa, como son el sodio, calcio, magnesio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. [56] [57]

Por lo anterior, se puede concluir que es necesario un tratamiento adecuado para la limpieza y blanqueo, de esta manera se eliminarían los contaminantes y podría ser incorporada al proceso de fabricación de papel.

5.2 SEPARACIÓN DEL FILME DE POLIETILENO Y ALUMINIO

Con base a la literatura, es necesaria la aplicación de calor para llevar a cabo la efectiva separación de las capas de polietileno y aluminio. [3] [11] [39] Se realizaron 4 pruebas diferentes, a continuación se muestran los resultados obtenidos en cada proceso.

- **Prueba 1. Sistema de separación de emisión térmica (convección)**

Se transfirió calor a la muestra de polietileno y aluminio con aire directamente, se observó que el polietileno se quemaba, esto fue causado por la acción del calor y el oxígeno del medio. Como se observa en la figura 46, la inyección del aire caliente a una distancia muy corta, no permitió un calentamiento homogéneo en la muestra, motivo por el cual se decidió utilizar una guía de cuarzo de 32 cm, obteniendo los siguientes resultados.



Figura 46. Oxicación de polietileno al aplicar calor al filme de p-p-a-p.

Tabla 12. Resultados con la inyección de calor con guía de cuarzo de 32cm.

Tiempo	Temperatura	Reacción
10 min	85°C	Sin cambio
20min	85°C	Sin cambio
30 min	85°C	Cambio significativo



Figura 47. Muestras sin reacción por medio de inyección de aire caliente.

Como se observa en la tabla 12, solo a los 30 minutos y 40°C se logra un calentamiento, lo que demuestra que no hay una eficiencia. En la figura 47 se observan las muestras sin ningún cambio después del calentamiento.

Debido a esto se reemplazo la guía de cuarzo de 32 cm por una de 18 cm, para que de esta manera el flujo de aire caliente este en contacto con la muestra de manera que permita un calentamiento homogéneo.

Como se observa en la tabla 13, a los 30 minutos de la prueba se logro un calentamiento significativo en la muestra, pero debido a que esta prueba requería mucho tiempo para lograr una reacción del polietileno, que se traduce en gasto energético, se decidió optar por otro método que fuera más eficiente y con menor costo en la separación.

Tabla 13. Resultados obtenidos con la inyección de calor con guía de 10cm.

Tiempo	Temperatura	Reacción
10 min	90°C	Sin cambio
10min	100°C	Sin cambio
10 min	110°C	Sin cambio
10 min	120°C	Sin cambio
20 min	90°C	Calentamiento 30°C
20min	100°C	Calentamiento 32°C
20 min	110°C	Calentamiento 35°C
20 min	120°C	Calentamiento 39°C
30 min	90°C	Calentamiento 49°C
30min	100°C	Calentamiento 57°C
30 min	110°C	Calentamiento 63°C
30 min	120°C	Calentamiento 70°C

Empleando esta técnica se pudo concluir que este proceso no es una alternativa viable, ya que se requiere gran cantidad de temperatura y un tiempo de transferencia de calor elevado, lo cual aumenta el costo del proceso.

A demás se observa que el polietileno al aplicarle calor reacciona con el oxígeno presente en el medio, y esto ocasiona la oxidación del aluminio, y la obtención de vapores que son contaminantes, para lo que sería necesario implementar un proceso de recuperación y neutralización, elevándose el costo en el proceso.

- **Prueba 2. Sistema de separación con microondas**

Para llevar a cabo la separación con microondas se utilizó en primer lugar un contenedor refractario de arcilla roja. En la tabla 14 se muestran los

parámetros seguidos en la realización de la prueba y los resultados obtenidos, así como el costo energético que se tiene en la experimentación.

Tabla 14. Parámetros para la separación por microondas con contenedor refractario de arcilla.

Tiempo	Temperatura de contenedor	Resultado
5 min	50°C	Sin cambio
10 min	70°C	Sin cambio
15 min	90°C	Sin cambio
20 min	100°C	Calentamiento 40°C

Como se observa en la tabla 14 no se obtuvieron resultados favorables que mostraran el inicio de una separación, motivo por el cual se tomó la decisión de cambiar el contenedor refractario por uno con alto contenido de alúmina y baja densidad, para verificar si de esta manera se lograba una separación en el filme de polietileno con aluminio.

En la tabla 15 se observan los resultados obtenidos en la prueba con este contenedor refractario; como se puede observar, el cambio de la composición del contenedor no mejoró los resultados obtenidos anteriormente con el contenedor de arcilla.

Tabla 15. Resultados Obtenidos en la prueba con contenedor de alto contenido de alúmina.

Tiempo	Temperatura de contenedor	Resultado
5 min	90°C	Sin cambio
10 min	150°C	Sin cambio
15 min	190°C	Sin cambio
20 min	250°C	Separación preliminar

De lo anterior se dedujo que el contenedor refractario de alúmina absorbía el calor hasta un espesor, evitando el paso de calor a la película; por lo tanto se requirió un contenedor de diferentes características, como ser poroso y tener baja densidad, para que permita el paso de calor, sin que las microondas lleguen al aluminio.

Por lo anterior, se decidió trabajar con un contenedor refractario de caolín y tergapor, ya que para que se propague con mayor eficacia el calor hacia la muestra, es necesario de un contenedor de baja densidad que permita el paso de las microondas hasta cierto espesor, de tal manera que el calor este en contacto directo con la muestra y ocurra una mejor separación entre el filme de polietileno y aluminio.

Debido a que el contenedor refractario con las características anteriormente descritas, no se encontró para su compra, se realizó la fabricación de este. Ya que no existía una metodología definida para la fabricación del contenedor, no se obtuvo el contenedor con las características necesarias.

Por este motivo, se propone para investigaciones posteriores, optimizar la metodología para la elaboración del contenedor adecuado para realizar la separación del conjunto p-p-a-p por medio del proceso de microondas.

- **Prueba 3. Sistema de separación con LASER**

Se realizó la prueba con un laser de Nd:YAG a una longitud de onda de 1064nm. Se presentan los resultados por medio del análisis por microscopia óptica.

Se observa en las figuras 48 A, B, D, E, G, que el laser perforo la lamina de polietileno-aluminio, esto fue ocasionado porque la energía de los pulsos láser son absorbidos por el aluminio, como el polietileno no absorbe en esta longitud de onda, provoca un aumento en la temperatura del aluminio. Esto

provocó que el aluminio se haya evaporado ya que alcanzó la temperatura de vaporización (2519°C).

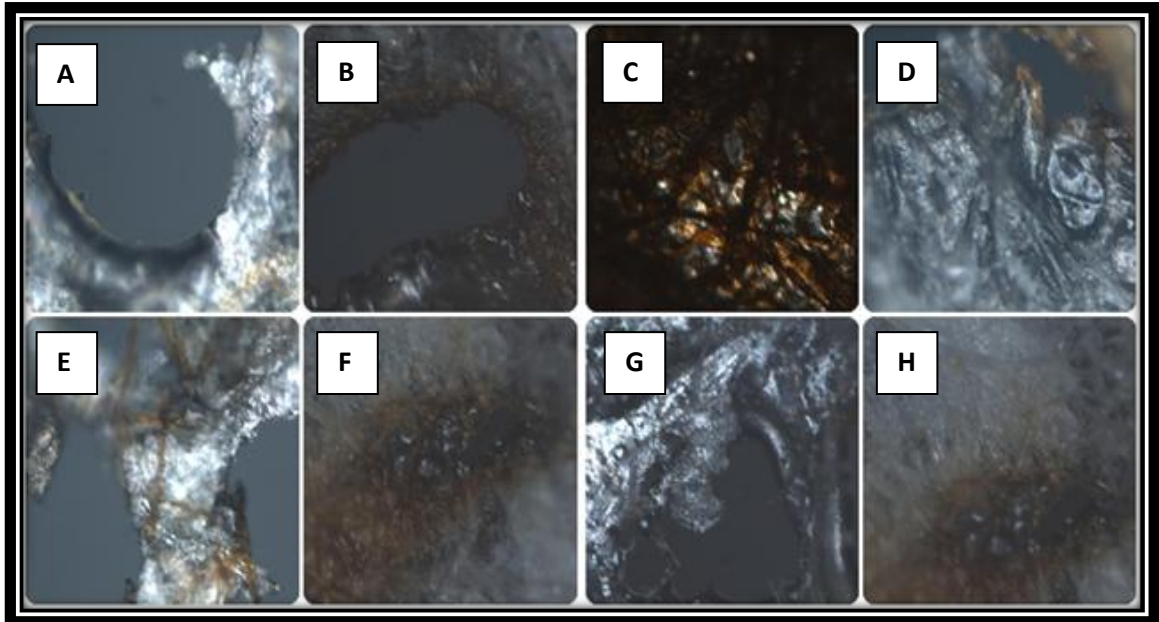


Figura 48. Análisis en el microscopio óptico del filme de aluminio y polietileno.

En las figuras 48 C, F y H, se puede observar que el aluminio se evaporó, quedando las fibras de polietileno aun unidas. Además, como la radiación del laser abarca un diámetro pequeño, se requeriría de un tiempo prolongado para abarcar completamente la muestra, lo cual genera de igual forma, un aumento en el costo del proceso.

5.3 PROPUESTA DE SUBPRODUCTOS

- Cartón

Incorporación al proceso de elaboración de papel higiénico. El papel utilizado en la fabricación de los envases multilaminados es de alta calidad, es de fibras largas, las cuales ofrecen mayor resistencia en la formación de papel,

aun reciclado. [53] Por lo que se propone la incorporación de la pulpa recuperada al proceso de elaboración de papel higiénico de la papelera local.

- Polietileno de baja densidad

Construcción de tubería flexible. El mayor uso del polietileno de baja densidad es en el sector del envase y empaque (bolsas, botellas, tuberías de riego, entre otros). [33] Es por eso que se propone la producción de tubos de polietileno. Estos tubos son fáciles de usar y tienen una amplia aplicación, tales como envases para cosméticos, envases de uso farmacéutico, envases de aceites industriales, etc. Se realiza una mezcla de polietileno de baja densidad recuperado con etilen vinil acetato, de esta forma se logra incrementar sus propiedades físicas como es la flexibilidad. [58]

- Aluminio

Elaboración de perfiles. La relación resistencia-peso del aluminio, junto a su durabilidad, resistencia a la corrosión, ductilidad y maleabilidad, hacen que sea la mejor elección de la industria de la construcción. [59]

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

- Se concluye que el proceso de separación del cartón con mejor resultado, fue con el sistema de agitación de 4 aspas con una velocidad de 7500rpm a una temperatura de 80°C, reduciendo el tiempo de separación de 35 - 45 minutos (estándar) a 15 minutos.
- En la separación del filme de polietileno y aluminio, En la separación del filme de polietileno y aluminio, se puede concluir que los 3 procesos empleados para efectuar esta separación nos dejan bases sólidas, para definir los parámetros adecuados que nos permitirán la separación del polietileno y aluminio, con menor tiempo y por lo tanto menor costo energético.
- Debido a las características químicas de las 3 capas que componen el envase multilaminado y los procesos empleados para la separación de estas, es posible la reincorporación en algún proceso ya existente.

RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN

De la presente tesis surgen las siguientes propuestas de investigación que resultan importantes:

- Establecer el proceso adecuado para la limpieza y blanqueo de la celulosa obtenida por medio de un tratamiento enzimático.
- Investigar la posibilidad de incorporar la pulpa para papel proveniente del envase multilaminado en el proceso productivo de la papelera local.
- Establecer la metodología correcta para la elaboración del contenedor adecuado para realizar la separación del filme de polietileno y aluminio por medio del proceso de microondas.
- Realizar un estudio sobre la generación de los envases multilaminados en nuestro país. Indicar los estados donde se presenta un consumo mayor de estos envases.

ANEXO

ANEXO A

CONCEPCIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN Y TRIAJE DE ENVASES MULTILAMINADOS

Debido a la cultura del úselo y tírelo y la invención de nuevos materiales, la capacidad de auto-depuración propia de la naturaleza se está viendo amenazada. [6] No existe duda que los materiales plásticos, metales, vidrios, entre otros, sean útiles para el hombre. Sin embargo, la falta de mecanismos de control sobre su uso y la inexistencia de sistemas de recolección, reciclaje y disposición final adecuada, hacen que estos nuevos materiales se transformen en un problema. [60]

Por la falta de cultura de reciclaje en este país, respecto a los envases multilaminados, se propone un proceso en el cual se puede recolectar estos envases desde los basureros de cielo abierto (BCA) donde habitualmente son vertidos los residuos sólidos urbanos (RSU). [61]

El proceso que se propone, comienza con un tanque de alimentación, donde se encuentran los RSU, estos son transportados por una zaranda vibratoria para que en esta los RSU se disgreguen a través de esta. [62] Para luego pasar al separador por Corrientes de Foucault, al final de este se tiene un tambor imantado [63], el cual hará que los metales no férricos (donde se encuentran los envases multilaminados) salgan expulsados, los metales férricos son atraídos y los no metales caen por gravedad. Debido a esto, los metales férricos y los no metales serán depositados en tanques, los cuales serán llevados a su disposición final adecuada. [64]

En lo que respecta a los metales no férricos, al ser expulsados por el efecto de las Corrientes de Foucault, llegan a otro separador por Corrientes de Foucault, en el cual se tiene una separación de los envases multilaminados, y los demás metales no férricos, son depositados en un contenedor y llevados a su disposición final adecuada. [65] Después de estos procesos se realizara una selección específica de los envases multilaminados, los cuales pasaran por una cinta transportadora y por medio del triaje se garantizara la obtención de solo la

materia prima de importancia para este proyecto, los envases multilaminados, lo anterior se observa en la figura 49.

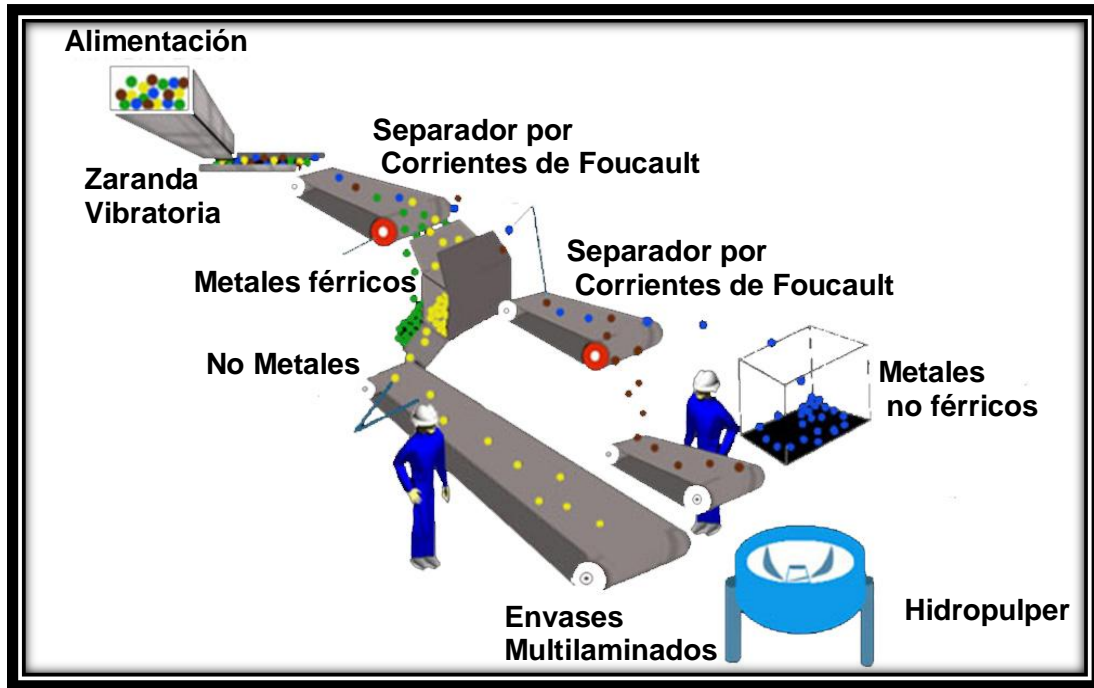


Figura 49. Concepción del proceso de separación y triaje de envases.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. S. Aranguren Balerdi, «Guía para la implantación de las buenas prácticas de fabricación para empresas que elaboran materiales y objetos destinados a estar en contacto con alimentos.,» Consebro, Pamplona, 2012.
- [2] L. A. Chala, «Empaques y embalajes para exportación,» de *Seminario de Centro Internacional de Negocios*, Bogotá, 2010.
- [3] R. Enriquez y P. Lina, «La responsabilidad ampliada, una respuesta normativa al problema de contaminación ambiental por envases multicapas.,» Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, México, 2006.
- [4] D. Buenronstro, «Clasificación de generadores y modelos de generación potencial,» de *Los residuos sólidos municipales*, México, Universidad Autónoma de México, 2000, p. 8.
- [5] M. Biagioli, «Residuos sólidos urbanos: Una guía practica para la separación en origen en elPpartido de la Plata.,» Garten Group SRL, Argentina, 2010.
- [6] V. Aude Luppi, L. Bertini, M. Fidalgo y F. Yrazu, «Influencia en la generación y posterior gestión de residuos sólidos urbanos,» Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Buenos Aires, 2011.
- [7] T. Pak, «Dossier de Prensa,» Tetra Pak Iberia, España, 2012.
- [8] L. Frías Romero, «Recuperación energética de los residuos urbanos con tecnología por plasma,» Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2008.
- [9] J. R. Castro Perez, «Concienciación Tetrapak,» Tetra Pak, México, 2011.
- [10] J. Cases Rocati, «Procedimiento para la recuperación de aluminio y energía a partir de envases usados tipo tetrabrik y horno para realizarlo,» Oficina Español de Patentes y Marcas, Madrid, 1999.
- [11] Szente, «Recovering aluminium via plasma processing,» *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 49, nº 11, pp. 52-55, 1997.
- [12] L. M. Nuñez Álvarez, «El envase de cartón laminado tipo Tetra Brik: un problema ambiental y sus posibilidades de aprovechamiento.,» Centro Interdisciplinario de Investigaciones y

Estudios sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, México, 2005.

- [13] L. Carvevale, «Piracicaba vai reciclar embalagem longa-vida,» Gazeta de Piracicaba, Piracicaba, 2005.
- [14] L. Frías Romero, «Pirólisis,» de *Recuperación energética de los residuos urbanos con tecnología por plasma*, Madrid, Universidad Pontificia Comillas, 2008, pp. 73-89.
- [15] A. Corma Canós y J. Primo Millo, «Procedimiento para recuperar polietileno y aluminio de hojas de aluminio recubiertas de polietileno de residuos de envases tipo "pack",» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1997.
- [16] B. Froats, «Apparatus for separating paper fibres from portions of polyethylene film material,» United States Patent, Ontario, 1979.
- [17] M. Henrique de Cerqueira, «Placas e telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno/aluminio presentes nas embalagens tetra pak,» Coletanea de Artigos Técnicos, Brasil, 2003.
- [18] M. B. Fourcade, «Diseño de packaging y marca para café helado,» Universidad de Palermo, Palermo, 2010.
- [19] T. pak, «Tecnologías de reciclado: Aluminio y Polietileno,» Tetrapak, Argentina, 2012.
- [20] SEMARNAT, «Principales materiales usados para envases,» de *Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos*, México, SEMARNAT, 2002, p. 191.
- [21] I. Sueco, «Innovaciones Suecas,» Estocolmo, 2003.
- [22] J. Idrovo Hernández, J. Morán Moncayo, E. Orejuela Guzmán y G. Bastidas Riofrio, «Proyecto de producción y comercialización de menestras de fréjoles y lentejas para consumo masivo y al instante en envases tetrapack para el mercado de la ciudad de Guayaquil,» Centro de Investigación científica y tecnológica, Guayaquil, 2010.
- [23] M. Robles, «Diseño gráfico de envases asépticos para leche marca Tetra Pak,» Universidad Iberoamericana, México, 1995.
- [24] T. Pak, «¿Qué sucede con los cartones para bebidas usados?,» Tetra Pak España, España, 2003.
- [25] B. Barrios, «Envase y embalage de alimentos: protección que proporciona el envase laminado polietileno-cartón-polietileno-aluminio-polietileno al néctar de manzana durante

- su vida de anaquel,» Universidad Nacional Autonoma de México, México, 2002.
- [26] L. Neves, «Reciclagem de embalagens cartonadas Tetra Pak.,» O Papel, Brasil, 1999.
- [27] S. Escalera, «Enfoque de ciclo de vida en Tetra Pak,» Seminario sobre Analisis del ciclo de vida de los residuos, México, 2004.
- [28] A. L. Mourad, E. García, G. Braz Vilela y F. Von Zuben, «Influence of recycling rate increase of aseptic carton for long-life milk on GWP reduction,» *Science Direct*, nº 52, pp. 681-685, 2007.
- [29] J. García Hortal, «Fibras Papeleras,» UPC, Barcelona, 2007.
- [30] R. Carrere y L. Lohmann, «Plantaciones forestales en la estrategia papelera internacional,» El papel del Sur, Uruguay, 1995.
- [31] A. Isogay, «Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas,» *Journal of pulp and paper science*, vol. 26, nº 9, p. 199, 2000.
- [32] Gaiker, «Reciclado de materiales: Perspectivas, tecnologías y oportunidades,» Paper Birzklataua, Bizkaia, 2007.
- [33] F. Billmeyer, «Plásticos Y elastómeros,» de *Ciencia de los Polímeros*, Barcelona, Reverté, 2004, pp. 388-389.
- [34] L. Bilurbuna, «Materiales no metálicos resistentes a la corrosión,» España, 1990.
- [35] J. Justo Soto, R. Ortega Gordillo y C. López Salas, «Producción de pulpa de cartón y tableros de polialuminio,» *Fondo Nacional del Ambiente*, nº 001-RS, pp. 24-28, 2008.
- [36] A. Velásquez, «Procesos productivos del papel,» Instituto Americano de Desarrollo Empresarial, Managua, 2007.
- [37] J. Tello Cruz y I. I. Gutierrez Villegas, «Diseño del sistema de producción y organización de una empresa cartonera,» Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, 2006.
- [38] L. Neves, «Efeito da intercao entre fibras virgens e recicladas nas características físicas de cartoes multifolhados,» Esalq, Piracicaba, 2000.
- [39] L. Neves, «Novos desenvolvimentos para reciclagem de embalagens longa vida,»

- Seminario Internacional de reciclagem do aluminio, Piracicaba, 1999.
- [40] F. Incropera, «Convección,» de *Fundamentos de transferencia de calor*, México, Prentice Hall, 1999, pp. 5-8.
- [41] A. E. Panana Girio, «Introducción a la transferencia de calor,» de *Texto Universitario: Transferencia de Calor*, Bellavista, Universidad Nacional de Callao, 2007, pp. 1-19.
- [42] J. M. Miranda, J. L. Sebastián, M. Sierra y J. Margineda, «Líneas de transmisión,» de *Ingeniería de Microondas: Técnicas Experimentales*, Madrid, Prentice Hall, 2002, p. 38.
- [43] C. Strauss y R. Varma, «Microwaves in green and sustainable chemistry,» *Springer*, pp. 201-206, 2006.
- [44] E. Ukar, S. Martinez, A. Lamikiz y I. Tabernero, «Modelo térmico láser con transformaciones intermedias en calentamiento,» de *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, España, 2010.
- [45] A. Cuesta Arranz, «Tecnología láser,» de *Tecnología laser y sus aplicaciones industriales*, Barcelona, Marcombo, 2011, pp. 39-73.
- [46] D. Skoog, J. Holler y S. Crouch, *Principios de las mediciones ópticas de transformada de Fourier*, México: Cengage Learning, 2008, pp. 204-207.
- [47] M. Matteini y A. Moles, «Difracción de rayos X,» de *Ciencia y restauración*, Andalucía, Nerea, 2001, pp. 125-131.
- [48] P. Adeva, «Microscopía electrónica de Barrido y microanálisis,» de *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*, Madrid, Raycar, 2001, pp. 485-500.
- [49] R. Cabrera Aguilar, «Equipos para caracterización,» de *Obtención y caracterización de recubrimientos de sialon mediante RF sputtering*, Pachuca, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2007, pp. 19-31.
- [50] J. D. Santos Amado, P. Y. Malagon Villafrades y E. M. Córdoba Tuta, «Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos,» *Escuela de Metalurgia y Ciencia de Materiales*, Santander, 2009.
- [51] Insultherm, «Características de ladrillo refractario,» Monterrey, 2012.
- [52] Cesar, «Fusión de metales en el horno de microondas,» España, 2010.

- [53] C. E. Núñez, «Anatomía de la madera,» *Pulpa y papel*, vol. I, nº 4, pp. 1-12, 2008.
- [54] G. Flores Rozas y R. Melo Sanhueza, «Blanqueo de pulpas de alto rendimiento con peróxido a presión,» Universidad de Concepción, Concepción, 1999.
- [55] S. Turrado, Q. Reynoso, G. Aburto, C. Saucedo, D. Sanjuan y R. Vargas, «La enzima estereasa como alternativa de control de stickies,» Departamento de madera, celulosa y papel, Guadalajara, 2007.
- [56] G. Marques Silva, «Estudio sistemático de la composición química de la fibra de la planta de curauá y su evolución durante el proceso de cocción a la soda-AQ,» Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, Sevilla, 2005.
- [57] M. C. Monte Lara, «Depósitos adherentes en el proceso de fabricación de papel reciclado,» Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2000.
- [58] T. Plant, «Planta de producción de tubos de PE,» Taiwan Turnkey project Association, Taiwan, 2012.
- [59] T. Plant, «Planta de manufactura de puertas, ventanas y perfiles de aluminio,» Taiwan Turnkey Project Association, Taiwan, 2012.
- [60] CIT, «Aportes para el capítulo "Envases" de una eventual Ley de Residuos Sólidos Urbanos (RSU),» *Plastivida*, nº 10, pp. 12-16, 2007.
- [61] Scudelati, «Plantas de recuperación /Tratamiento de residuos sólidos urbanos,» Scudelati & Asociados, Argentina, 2008.
- [62] S. S. M. Co., «Criba vibratoria,» SBM, Shanghai, 2012.
- [63] R. Freire, «Tambores magnéticos,» Virason, Buenos Aires, 2012.
- [64] L. Perez, H. Peralta y R. Bianchi, «Estudio de las corrientes de Foucault a través del enfoque magnetostático.,» Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2003.
- [65] R. Cetrisa, «Separación de latas & briks por corrientes de Foucault,» Regulación de Motores S.A., España, 2011.
- [66] T. Croft, C. Carr y J. Watt, «Lámparas infrarrojas de calefacción,» de *Manual del montador electricista*, Barcelona, Reverté, 1994, pp. 110- 111.
- [67] C. J. Martin Falces, «Los infrarrojos,» Zaragoza, 2011.

