

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO DEL PROCESO DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO
EXPANDIDO POR EL MÉTODO DE DISOLUCIÓN –
PRECIPITACIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

PAOLA VANESSA SALTOS BARREIRO
paosts_barreiro@hotmail.com

DIRECTOR: ING. FRANCISCO QUIROZ
francisco.quiroz@epn.edu.ec

Quito, julio 2015

© Escuela Politécnica Nacional (2015)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Paola Vanessa Saltos Barreiro, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Paola Vanessa Saltos Barreiro

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Paola Vanessa Saltos Barreiro, bajo mi supervisión.

Ing. Francisco Quiroz
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Luego de este arduo escalar he llegado al fin de esta meta, entre retos, desaires y gratos momentos encontré a nobles personas, a quiénes sin duda les debo gran parte de este logro.

En especial, a mis *Gotas*, Gaby, Sandrita, Tfi y Lore, gracias por adoptarme y hecharme la mano en todo momento, no solo fue en la u sino que me he ganado grandes amigas para compartir y apoyarnos a lo largo de la vida. Junto a ellas, Rol, Vero y Toper, gracias chicos por todas las risas en aquellas situaciones complicadas, las “ayudas académicas”, las charlas, los consejos y demás experiencias a su lado hicieron más llevadero este andar.

Al Ing. Quiroz por permitirme ser parte de la gran familia que es el CIAP, agradezco su amistad y conocimientos; así también a Liz, Ing. Vlady, Juan y al Ing. Omar. Al Ing. Miguel gracias por todo, sin su motivación y confianza no hubiésemos conseguido el premio.

Mi más sincera gratitud a Ivancito porque sin su sabiduría, dirección, paciencia y apoyo no hubiese sido posible este proyecto; sobre todo gracias por ser un amigo tan valioso.

A los *chispum CIAP*, Andre, Jenny, Carlín, Jose y Andrés, los “compañeros” siempre haciendo la diferencia para que la llegada a este logro sea más amena. En particular a mi Andre, gracias por la compañía en toda esta vida llamada universidad.

A Fernando, por unirse con paciencia y comprensión en la parte más difícil de esta travesía y continuar a mi lado, su apoyo y confianza en mí siempre me alienta.

A toda mi familia, mis hermanos, mi ñaña Nancy y mi abue, de una u otra forma siempre me apoyaron.

Principalmente, gracias a mis padres por sus esfuerzos, su paciencia y apoyo incondicional para encaminarme hasta mi carrera profesional, Uds. me hicieron quien soy.

A Dios porque siempre está conmigo para aliviarme y brindarme fuerza para continuar.

DEDICATORIA

Para Nelly y Germán, quienes son mi inspiración de vida, mi madre por su sacrificio y compañía, mi padre por su apoyo y esfuerzo; siempre con amor me animaron a seguir adelante. Por ustedes y por mí es éste logro.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Propiedades del poliestireno	1
1.1.1 Generalidades del poliestireno	1
1.1.1.1 Poliestireno de alto impacto (HIPS)	2
1.1.1.2 Poliestireno orientado (OPS)	3
1.1.1.3 Poliestireno expandido (EPS)	4
1.1.2 Propiedades mecánicas	5
1.1.3 Propiedades térmicas	7
1.1.3.1 Temperatura de transición vítrea	7
1.1.3.2 Resistencia a la distorsión térmica	8
1.1.3.3 Aislante térmico	9
1.1.4 Propiedades reológicas	10
1.1.4.1 Viscosidad en solución	10
1.1.4.2 Peso molecular	12
1.1.4.3 Viscosidad en estado fundido	13
1.1.5 Propiedades químicas	16
1.1.6 Propiedades ópticas	18
1.2 Reciclaje de poliestireno expandido (EPS)	19
1.2.1 Reciclaje mecánico	21
1.2.2 Reciclaje químico	22
1.2.3 Reciclaje energético	23
1.2.3.1 Pirólisis por microondas	24
1.2.4 Otras técnicas	25
1.2.4.1 Disolución	25
1.2.4.2 Reciclaje térmico	27
2. PARTE EXPERIMENTAL	28
2.1 Caracterización del poliestireno expandido (EPS) recolectado	28
2.2 Desarrollo del proceso de reciclaje de poliestireno expandido (EPS) por disolución – precipitación	30
2.2.1 Método disolución – precipitación	31
2.2.2 Caracterización del polímero recuperado	34
2.2.3 Recuperación del solvente y agente precipitante	36
2.2.4 Recuperación del alcohol isopropílico	37
2.3 Diseño del proceso de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)	38

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1	Caracterización de los residuos de poliestireno expandido (EPS) recolectados	39
3.1.1	Espectroscopia infrarroja	39
3.1.2	Viscosimetría	41
3.1.3	Análisis termogravimétrico	42
3.1.4	Calorimetría diferencial de barrido	43
3.2	Evaluación del proceso de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)	44
3.2.1	Caracterización por espectroscopia infrarroja del polímero recuperado	44
3.2.1.1	Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 10 % EPS y precipitación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG	45
3.2.1.2	Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 20 % EPS y precipitación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG	46
3.2.1.3	Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 30 % EPS y precipitación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG	47
3.2.1.4	Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 y 1/2 THF/EG	48
3.2.2	Caracterización por termogravimetría del polímero recuperado	50
3.2.3	Caracterización por viscosimetría del polímero recuperado	64
3.2.3.1	Aproximación del peso molecular del polímero recuperado	66
3.2.4	Caracterización por calorimetría diferencial de barrido del polímero recuperado	67
3.2.5	Caracterización por espectroscopia infrarroja de los reactivos recuperados en la destilación	70
3.2.5.1	Infrarrojo del destilado de la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación	71
3.2.5.2	Infrarrojo del residuo de la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación	73
3.2.5.3	Infrarrojo del destilado de la solución filtrada del proceso de lavado	75
3.2.5.4	Infrarrojo del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado	77
3.2.6	Determinación de la pureza de los reactivos recuperados	80
3.2.6.1	Pureza de los productos de la destilación de la solución THF - EG	80
3.2.6.2	Pureza de los productos de la destilación de la solución alcohol - EG	82
3.3	Diseño del proceso de reciclaje de poliestireno expandido (EPS) a escala piloto	83
3.3.1	Capacidad de la planta	83
3.3.2	Diagramas del proceso	84
3.3.3	Plano de simbología y nomenclatura utilizada en equipos y líneas de corriente	84
3.3.4	Descripción detallada del proceso	87
3.3.5	Balance de masa	89

4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
4.1	Conclusiones	91
4.2	Recomendaciones	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
	ANEXOS	101

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Propiedades mecánicas del poliestireno según su tipo	6
Tabla 1.2.	Propiedades físicas del poliestireno expandido al variar su densidad	6
Tabla 3.1.	Bandas características de la absorción en el infrarrojo del poliestireno	40
Tabla 3.2.	Bandas características de la absorción atmosférica en el infrarrojo	44
Tabla 3.3.	Variación de las temperaturas de degradación de los poliestirenos recuperados en cada ensayo	59
Tabla 3.4.	Variación del índice de fluidez de los poliestirenos recuperados en cada ensayo	64
Tabla 3.5.	Temperatura de transición vítrea de los poliestirenos recuperados del reciclaje de EPS	68
Tabla 3.6.	Bandas características de la absorción en el infrarrojo del tetrahidrofurano	72
Tabla 3.7.	Bandas características de la absorción en el infrarrojo del etilenglicol	73
Tabla 3.8.	Bandas características de la absorción en el infrarrojo del alcohol isopropílico	76
Tabla 3.9.	Índice de refracción de los productos obtenidos por destilación de la solución THF – EG y compuestos puros	80
Tabla 3.10.	Índice de refracción de los productos obtenidos por destilación de la solución alcohol – EG y compuestos puros	82
Tabla 3.11.	Simbología y nomenclatura de los equipos que constituyen el PFD del proceso de reciclaje de EPS	84
Tabla 3.12.	Nomenclatura de las líneas de corriente que constituyen el PFD del proceso de reciclaje de EPS	87
Tabla 3.13.	Flujos másicos de las corrientes principales del proceso de reciclaje de EPS	90
Tabla AI.1.	Parámetros de solubilidad dimensionales de los solventes	102

Tabla AII.1.	Datos experimentales para la determinación del peso molecular del EPS	104
Tabla AII.2.	Datos utilizados en la determinación del peso molecular del EPS	105
Tabla AII.3.	Viscosidades de la solución de EPS en metil etil cetona a diferentes concentraciones	106
Tabla AIII.1.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 10 % EPS - 1/1 THF/EG	108
Tabla AIII.2.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 10 % EPS – 1/2 THF/EG	108
Tabla AIII.3.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 10 % EPS – 1/3 THF/EG	109
Tabla AIII.4.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 20 % EPS – 1/1 THF/EG	109
Tabla AIII.5.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 20 % EPS – 1/2 THF/EG	109
Tabla AIII.6.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 20 % EPS – 1/3 THF/EG	110
Tabla AIII.7.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 30 % EPS – 1/1 THF/EG	110
Tabla AIII.8.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 30 % EPS – 1/2 THF/EG	110
Tabla AIII. 9.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 30 % EPS – 1/3 THF/EG	111
Tabla AIII.10.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 40 % EPS – 1/1 THF/EG	112
Tabla AIII.11.	Datos para determinación del MFI del poliestireno 40 % EPS – 1/2 THF/EG	112
Tabla AIV.1.	Información recopilada de los poliestirenos disponibles en el mercado	117
Tabla AVII.1.	Volúmenes recuperados después de la destilación de la solución THF – EG	124
Tabla AVII.2.	Volúmenes recuperados después de la destilación de la solución alcohol – EG	125

Tabla AIX.1. Datos experimentales tomados en la ejecución del proceso de reciclaje

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Estructura del poliestireno	1
Figura 1.2.	Diagrama temperatura versus peso molecular para polímeros amorfos	8
Figura 1.3.	Expansión térmica del poliestireno	9
Figura 1.4.	Perfil de velocidad de cizallamiento en función de la viscosidad de cizalla	15
Figura 1.5.	Solubilidad del poliestireno en varios solventes	17
Figura 2.1.	Homogeneización de los desechos de EPS fragmentados	29
Figura 2.2.	Proceso de disolución del EPS recolectado	32
Figura 2.3.	Proceso de precipitación del poliestireno	33
Figura 2.4.	Polímero recuperado: a. precipitado, b. seco y c. molido	34
Figura 3.1.	Espectro del poliestireno expandido recolectado	39
Figura 3.2.	Determinación de la viscosidad intrínseca por medio del gráfico η_{red} vs. c	41
Figura 3.3.	Termograma correspondiente al análisis termogravimétrico del poliestireno expandido recolectado	42
Figura 3.4.	Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno expandido recolectado	43
Figura 3.5.	Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 10 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG	45
Figura 3.6.	Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 20 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG	46
Figura 3.7.	Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 30 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG	48
Figura 3.8.	Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 40 % EPS y precipitación al 1/1 y 1/2 THF/EG	49

Figura 3.9.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	51
Figura 3.10.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	52
Figura 3.11.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG	52
Figura 3.12.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	53
Figura 3.13.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	54
Figura 3.14.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG	54
Figura 3.15.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	55
Figura 3.16.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	56
Figura 3.17.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG	57
Figura 3.18.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	58
Figura 3.19.	Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	58
Figura 3.20.	Contenido de etilenglicol en el polímero recuperado en función de la cantidad de agente precipitante usada en la precipitación (1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG)	60

Figura 3.21.	Poliestirenos precipitados con relación: a. 1/1 THF/EG, b. 1/2 THF/EG y c. 1/3 THF/EG	61
Figura 3.22.	Espectro del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG comparado con el espectro bibliográfico	63
Figura 3.23.	Índice de fluidez de los poliestirenos reciclados en función de la cantidad de agente precipitante usada en la precipitación (1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG)	65
Figura 3.24.	Variación de la temperatura de transición vítrea de los poliestirenos recuperados en función de la cantidad de agente precipitante utilizada en la precipitación (1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG)	69
Figura 3.25.	Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG	70
Figura 3.26.	Espectro del destilado de la solución filtrada del proceso disolución – precipitación	71
Figura 3.27.	Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso disolución – precipitación	74
Figura 3.28.	Espectro del destilado de la solución filtrada del proceso de lavado	75
Figura 3.29.	Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado comparado con sus componentes	77
Figura 3.30.	Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado comparado con el estándar bibliográfico del alcohol isopropílico	78
Figura 3.31.	Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado comparado con el estándar bibliográfico del etilenglicol	79
Figura 3.32.	Relación entre el índice de refracción y la concentración de tetrahidrofurano en etilenglicol	81
Figura 3.33.	Relación entre el índice de refracción y la concentración de isopropanol en etilenglicol	82
Figura 3.34.	Diagrama de bloques del proceso de reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución - precipitación	85
Figura 3.35.	Diagrama de flujo del proceso de reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución - precipitación	86

Figura AIV.1. Hoja de datos del poliestireno con MFI 18 g/10 min de la casa comercial Network Polymers	114
Figura AIV.2. Propiedades del poliestireno comercial ALDRICH 441147	114
Figura AIV.3. Hoja de datos del poliestireno con MFI 12 – 16 g/10 min de la casa comercial Sigma - Aldrich	115
Figura AIV.4. Características de los poliestirenos con MFI 20 y 30 g/10 min de la casa comercial Total Petrochemicals	115
Figura AIV.5. Características del poliestireno con MFI 14 g/10 min de la casa comercial Total Refining & Chemicals	116
Figura AIV.6. Hoja de datos del poliestireno con MFI 23 g/10 min de la casa comercial Total Refining & Chemicals	116
Figura AV.1. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	118
Figura AV.2. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	118
Figura AV.3. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG	119
Figura AV.4. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	119
Figura AV.5. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	120
Figura AV.6. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG	120
Figura AV.7. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG	121
Figura AV.8. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG	121

- Figura AV.9.** Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG 122
- Figura AV.10.** Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG 122

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Cálculo de la solubilidad	102
ANEXO II Cálculo del peso molecular del EPS	104
ANEXO III Cálculo del índice de fluidez de los poliestirenos reciclados	108
ANEXO IV Hojas de datos de los poliestirenos comerciales	114
ANEXO V DSC de los poliestirenos reciclados	118
ANEXO VI Pureza de los productos de la destilación	123
ANEXO VII Rendimiento de la recuperación de reactivos	124
ANEXO VIII Cálculo de la capacidad de la planta piloto	127
ANEXO IX Balance de masa	128

RESUMEN

Con el fin de obtener beneficio de los desechos de poliestireno expandido (EPS) se desarrolla este proyecto, mediante el cual se propone el diseño del proceso de reciclaje de EPS por el método de disolución – precipitación para recuperar poliestireno que pueda ser reprocesado. Siendo a la vez una alternativa para minimizar el impacto ambiental que implican los empaques de EPS de electrodomésticos postconsumo.

Los residuos de EPS recolectados fueron fragmentados hasta un tamaño de 4 mm, disueltos en tetrahidrofurano (THF) en proporciones de 10, 20, 30 y 40 % EPS y precipitados con proporciones de 1/1, 1/2 y 1/3 de etilenglicol (EG), bajo agitación mecánica continua. Con filtración se recuperó el polímero precipitado y con operaciones de secado, molienda y lavado se purificó el poliestireno recuperado.

Adicionalmente, se evaluó la posibilidad de recuperar los reactivos usados en el reciclaje. Se realizó una destilación fraccionada a la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación, para separar tetrahidrofurano de etilenglicol. Así también, se destiló la solución filtrada del proceso de lavado para separar isopropanol de etilenglicol.

A los polímeros recuperados se los caracterizó estructuralmente por espectroscopia infrarroja, por calorimetría diferencial de barrido se evaluó la temperatura de transición vítrea y por termogravimetría se conoció su composición y estabilidad térmica. Por medio de viscosimetría se midió el índice de fluidez para estimar su capacidad de procesamiento y su peso molecular.

El proceso de reciclaje propuesto permite procesar hasta un 30 % de desechos de EPS y con una relación volumétrica 1/3 THF/EG se obtiene un producto con menor contenido de contaminación. De los ensayos realizados se obtuvieron polímeros estructuralmente iguales al poliestireno con una impureza menor al 1,6 % por presencia del precipitante.

Para comparar los resultados se caracterizó por las mismas técnicas a los desechos de EPS recolectados. Se concluyó que los poliestirenos reciclados tienen un índice de fluidez entre 15,56 y 26,12 g/10 min por lo que pueden ser reprocesados por inyección y extrusión, la temperatura de transición vítrea y el peso molecular son similares a los residuos de EPS.

De las destilaciones se obtuvo tetrahidrofurano con una pureza del 97,80 %, etilenglicol al 95,60 % e isopropanol puro. Se recuperó aproximadamente el 75 % de solvente, 92 % del reactivo de lavado y alrededor del 99 % de agente precipitante.

Finalmente, se diseñó una planta piloto de reciclaje capaz de transformar 770 kg/día de desechos de EPS en poliestireno reciclado sin contaminación por remanentes y con una recuperación mayor al 80 % de los reactivos usados en el proceso.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos se han convertido en el material preferido para satisfacer las necesidades del consumidor, en el 2010 se estimó una producción mundial de 265 millones de toneladas de plásticos, de las cuales más de 3 millones corresponden al consumo de poliestireno expandido (EPS, por sus siglas en inglés), con un incremento del 6% al año. Resultado de este consumo es la generación de grandes cantidades de residuos y en consecuencia la reducción de la utilidad de los rellenos sanitarios (López et al., 2013, p. 992; Sekharan, Abraham y Thachil, 2012, p. 221).

El uso significativo del EPS se debe a que es el material predilecto para empaque de electrodomésticos, embalaje de alimentos, aislante y hormigones ligeros. Pero como empaque el EPS tienen un ciclo de vida corto por lo que termina en los botaderos ocupando cerca del 40 % del volumen del relleno o es incinerado, lo que ha obligado a varios países a optar por el reciclaje como una solución para mitigar el impacto ambiental que implican estos desechos (Acierno, Carotenuto y Pecce, 2009, p. 13; Samper et al., 2008).

A nivel nacional, servicios básicos de aseo urbano no logran manejar los desechos de forma satisfactoria y al no existir una cultura de disminución ni clasificación de los residuos la situación del reciclaje no es alentadora, según la estimación del EMASEO, solo se reciclan 9,73 % del total de desechos generados. Por lo que es necesario la acreditación de gestores ambientales para facilitar la manipulación de los desechos comunes, peligrosos e infecciosos (Castillo, 2012, p. 15).

Sin embargo, en la ciudad de Quito para el año 2013 existían 47 gestores tecnificados, 95 a mediana escala y 31 gestores artesanales vigentes, de estos gestores solamente 3 manejan los desechos de poliestireno y ninguno en el sector artesanal. En consecuencia, la reutilización y tratamiento de este desecho es insuficiente, considerando las 16,6 toneladas de residuos sólidos/día correspondientes al poliestireno que se producen solamente en el Distrito

Metropolitano de Quito, según estimaciones del año 2012 (Castillo, 2012, p. 21; Dirección Gestión de la Calidad Ambiental, 2013).

La problemática del EPS radica en su volumen debido a la baja densidad del material, el peso ligero implica que si no se lo compacta, menos de la mitad de una tonelada llenaría un contenedor de 12 m³, por lo que el transporte es muy costoso. A esta situación se suma que es considerado un material no biodegradable, por lo que si no se descompone permanecerá por años en los botaderos ocupando extensos espacios (Barnetson, 2004, p. 51; Schmidt et al., 2011, p. 931).

Con este preámbulo se puede concluir que estos residuos constituyen un problema ambiental, generan impacto visual en la ciudad, principalmente en los sectores que comercializan electrodomésticos y además en la disposición final de los desechos de EPS o “espuma flex” disminuyen la vida útil de los rellenos, por el gran volumen que ocupan y por la baja degradación del material.

Por esta razón, surge la necesidad y la iniciativa de desarrollar un proceso efectivo de reciclaje de EPS por el método de disolución – precipitación, como una alternativa de tratamiento post consumo de estos desechos, que permita recuperar poliestireno para ser comercializado como material apto para el reprocesamiento y a la vez sea amigable ambientalmente gracias a la reutilización de los solventes que se ocupan en el proceso.

El método sugerido surge como un complemento del reciclaje mecánico, pero al contrario de este proceso, no es necesario utilizar temperatura para transformar los desechos de EPS en polvo o granos de poliestireno adecuados para ser reprocesados; de modo que no se promueve la degradación de las cadenas y se obtiene un polímero reciclado con calidad competitiva con el poliestireno virgen (Achilias, Giannoulis y Papageorgiou, 2009, p. 450).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PROPIEDADES DEL POLIESTIRENO

1.1.1 GENERALIDADES DEL POLIESTIRENO

El poliestireno (PS) es un polímero ocupado extensamente en la vida cotidiana, desde aplicaciones sencillas como manufactura de envases, empaques de productos alimenticios y embalaje para productos electrónicos, hasta usos industriales, como componentes mecánicos y sensores químicos, biológicos y ópticos. Todo gracias a su durabilidad y estabilidad química, mecánica y dimensional (Chatterjee y Prasad, 2011, pp. 120, 124; Maharana, Negi y Mohanty, 2007, p. 729).

Se define al poliestireno como un polímero termoplástico de cadena lineal, estructuralmente formado por 1900 a 2900 unidades de estireno, por lo tanto es un polímero vinílico que surge de la polimerización del monómero del estireno por radicales libres. La transformación del doble enlace de carbono - carbono del estireno en enlaces simples para convertirse en poliestireno es la causa para su estabilidad química; este cambio se observa en la Figura 1.1 (Chatterjee y Prasad, 2011, pp. 123, 124).

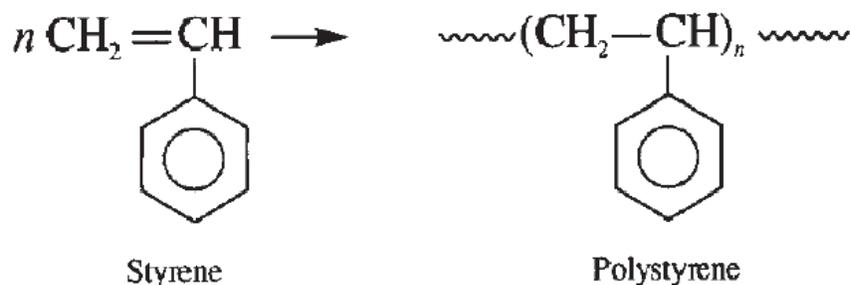


Figura 1.1. Estructura del poliestireno
(Brydson, 1999, p. 21)

El anillo bencénico en la estructura del poliestireno, sumada a su naturaleza amorfa debido a la presencia de ciertos segmentos atácticos que impiden su

cristalización, le proporcionan rigidez. Dada a la existencia del aromático, este polímero es susceptible a las reacciones características del grupo fenilo, por lo tanto se puede clorar, hidrogenar, nitrar y sulfonar; de manera que puede ser modificado para disminuir su fragilidad (Brydson, 1999, p. 433).

Los rasgos característicos del poliestireno, conocido como poliestireno de propósito general (GPPS), son su bajo peso específico, alta transparencia y brillo, color neutro, rigidez y a la vez fragilidad. Con el fin de ampliar y mejorar sus aplicaciones puede ser modificado por la incorporación de aditivos, fibras, polímeros de alto peso molecular y el aprovechamiento de la orientación intencional de sus moléculas y la copolimerización, para contrarrestar su fragilidad (Brydson, 1999, p. 437; Niessner y Wagner, 2013, p. 20).

1.1.1.1 Poliestireno de alto impacto (HIPS)

HIPS, por sus siglas en inglés, es el nombre que toma el poliestireno cuando es modificado con incrustaciones de polibutadieno, para lo cual se polimeriza la mezcla de caucho disuelto en estireno, obteniéndose un polímero de injerto. Las moléculas de caucho en las cadenas de estireno mejoran la resistencia al impacto del polímero reduciendo la propagación de grietas y por tanto previenen la fractura (Brydson, 1999, p. 438).

Las partículas de caucho no tendrían que notarse en la matriz polimérica por lo que se sugiere un diámetro menor de 50 μm , las mismas que pueden aportar opacidad. Estas partículas no deben ser compatibles con el poliestireno porque se desea mejorar la tenacidad y no tener una mezcla molecular, pero tampoco deben ser demasiado incompatibles porque perjudicaría la adhesión entre los polímeros, por lo tanto se selecciona una mezcla con un parámetro de solubilidad ligeramente diferente al poliestireno (Brydson, 1999, p. 438).

El HIPS puede tener siete veces más resistencia al impacto que el poliestireno ordinario, por efecto del polibutadieno en su estructura disminuye la resistencia a

la tensión y su dureza, lo cual se debe a la incorporación de estabilizadores que neutralizan la inestabilidad a la luz y al calor del polímero. Por tanto, las propiedades mecánicas del HIPS son fuertemente influenciadas por el peso molecular de la matriz, la proporción, tamaño y entrecruzamiento de las partículas de caucho del polímero de injerto (Brydson, 1999, p. 439; Niessner y Wagner, 2013, p. 18).

Las aplicaciones del HIPS tienen un estrecho vínculo con el tamaño de las partículas de caucho, si las partículas son medianas servirá para empaques de alimentos y si son más grandes el poliestireno tendrá mayor resistencia al impacto, frecuentemente usado en el revestimiento de los refrigeradores. Es empleado también para manufacturar contenedores para almacenamiento de artículos diversos, carcasas de electrodomésticos y recipientes translúcidos (Brydson, 1999, p. 463; Niessner y Wagner, 2013, p. 19).

1.1.1.2 Poliestireno orientado (OPS)

El propósito de orientar al poliestireno es incrementar la resistencia a la tensión del polímero, con este objetivo se obtiene el OPS, por sus siglas en inglés; con el que se puede fabricar filamentos monorientados o películas biorientadas. Consecuencia de esta modificación, la temperatura de reblandecimiento también disminuye debido a la inestabilidad de las moléculas orientadas (Brydson, 1999, p. 461).

Los filamentos pueden ser usados para hacer cepillos de cerdas o pantallas tejidas. Sus moléculas son orientadas por estiramiento en caliente de los filamentos extruidos. Las películas biorientadas también son extruidos y estirados lateral y longitudinalmente, para realizar empaques o bolsas y seguros a presión (Brydson, 1999, p. 461).

La resistencia a la tensión del OPS es 15 veces más grande que la del polímero ordinario, sumada a la dureza y claridad que caracterizan a estos poliestirenos.

Una película biorientada puede tolerar de 70 a 83 MPa y una elongación de 10 al 20 % antes de su ruptura; mientras que un poliestireno normal solo resiste de 41 a 55 MPa y un estiramiento del 2 al 5 % (Brydson, 1999, p. 462).

1.1.1.3 Poliestireno expandido (EPS)

El EPS es otra modificación del poliestireno, ampliamente usado como panel aislante y como material de empaque para juguetes, equipos eléctricos y electrónicos e inclusive productos alimenticios. Tiene la apariencia de pequeños granos esféricos que pueden formar bloques muy ligeros, debido a que están hechos en su mayoría por aire y un 4 al 7 % de agente expansor (Barnetson, 2004, p. 38).

El procesamiento de EPS consiste en expandir los pellets de poliestireno 40 veces su tamaño original en presencia de vapor, este calentamiento provoca que el agente expansor (pentano) ebulle y forme un polímero celular a manera de panal. Para que el EPS tome la forma requerida se transfiere los granos esféricos a moldes calentados con vapor. Adicionalmente, puede contener material ignífugo para usarlo en la construcción y sino será usado como empaque (Barnetson, 2004, p. 38).

En la etapa de pre – expansión la densidad del polímero baja de 630 kg/m^3 a valores entre 10 y 35 kg/m^3 , debido al aire contenido en el interior de las celdas. Este aire produce vacío y deja humedad, por lo que es necesario que los pellets expandidos reposen en silos donde se secan y la presión interna se iguala para favorecer a la etapa de moldeo. El reposo de 12 horas mejora la elasticidad y capacidad de expansión que adquieren los granos y se requiere de menor energía en la etapa de transformación (Barnetson, 2004, pp. 39, 40).

El EPS es moldeado como empaque debido a su excelente resistencia al impacto o como panel para aislación térmica en casas y oficinas. Sirve como material de protección para componentes electrónicos pequeños hasta refrigeradoras, debido

a su buena absorción de golpes y se puede apilar gracias a su resistencia a la compresión. Su propiedad de aislante térmico ayuda a mantener los alimentos frescos y protegidos (Barnetson, 2004, p. 41).

Dada la ligereza del EPS es un material atractivo para construir edificaciones seguras. Su baja conductividad térmica inhibe el paso del calor o del frío, esta propiedad así como las propiedades mecánicas no se verán afectadas por la humedad, dado a que no es un material higroscópico. En el ámbito de la construcción el uso del EPS incluye la fusión de este polímero con cemento para la elaboración de paredes, pisos o ladrillos ligeros (Barnetson, 2004, p. 42).

Las propiedades de un plástico espumado, como lo es el EPS, son una función de la estructura del polímero; es decir, de la geometría de las celdas, la composición, cristalinidad, orientación e historia térmica del poliestireno (Klempner y Frisch, 1991, p. 158).

1.1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

Estas propiedades pueden variar según el método de ensayo aplicado para su medición y dependen del peso molecular que tenga el poliestireno analizado, como se observa en la Tabla 1.1. En general, el poliestireno es un polímero frágil y rígido a temperatura ambiente, debido a la presencia del anillo bencénico que se resiste a la rotación de las cadenas, si se aumenta la temperatura se vuelve elástico y viscoso (Brydson, 1999, p. 434; Hernández, Selke y Culter, 2000, p. 109).

El poliestireno tiene una resistencia al impacto baja, menor a 0,68 J, pero comercialmente se puede encontrar el HIPS con una resistencia entre 1,36 a 5,42 J. Este aumento se debe al porcentaje y tamaño de las partículas de caucho incorporadas al polímero, aunque las propiedades de tensión y flexión se ven perjudicadas. El poliestireno modificado con caucho muestra mayor tenacidad que el GPPS, que es un polímero rígido y frágil (Jaypee's Medical, 2013, p. 23).

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas del poliestireno según su tipo

Propiedades	Método de ensayo	Grado del poliestireno			
		Uso general	Alto peso molecular	Resistente al calor	Alta fluidez
Fuerza a la tracción (MPa)	ASTM D638	40 - 48	45 - 52	45 - 52	40 - 48
Elongación (%)	ASTM D638	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5
Módulo en tensión (MPa)	ASTM D638	35	35	38	35
Fuerza a la flexión (MPa)	ASTM D790	62 - 76	69 - 83	76 - 97	62 - 76
Resistencia al impacto (kJ/m^2 <i>notched Izod</i>)	BSI493	1,31 – 1,84	1,31 – 1,84	1,31 – 1,84	1,31 – 1,84

(Brydson, 1999, p.434)

Las propiedades mecánicas son función del peso molecular del GPPS, considerando que se deterioran si el tamaño molecular del polímero es de $70\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. La fuerza a la tensión y la fuerza a la flexión son fuertemente dependientes del peso molecular; sin embargo, la baja elongación a la ruptura caracteriza a todos los poliestirenos (Niessner y Wagner, 2013, p. 20).

Si se habla del EPS, el hecho de que su estructura celular encierre aire le permite absorber la energía de un impacto y retornar a su forma original después de deformarse. En consecuencia, el EPS es utilizado como un excelente material de amortiguación, sus propiedades mecánicas se ven favorecidas por el aumento de la densidad del polímero, esta comparación se puede apreciar en la Tabla 1.2 (Barnetson, 2004, p. 45).

Tabla 1.2. Propiedades físicas del poliestireno expandido al variar su densidad

Densidad (kg/m^3)	15	25	40	50
Fuerza a la tensión (kPa)	200	350	600	750
Fuerza a la flexión (kPa)	200	400	700	900
Tensión al 10% de compresión (kPa)	90	180	320	400

(Barnetson, 2004, p. 45)

Las propiedades mecánicas se ven influenciadas por la geometría de las celdas y la densidad del polímero. Tanto los poliestirenos rígidos como los poliestirenos flexibles incrementan su resistencia a la flexión, compresión y tensión si aumenta su densidad. La resistencia al cizallamiento de los poliestirenos rígidos aumenta si se reduce la temperatura a la que se somete el polímero (Klempner y Frisch, 1991, p. 158).

1.1.3 PROPIEDADES TÉRMICAS

1.1.3.1 Temperatura de transición vítrea

El anillo bencénico en la cadena principal del poliestireno le proporciona una alta rigidez dada las limitadas vibraciones de los enlaces a temperaturas menores de la temperatura de transición vítrea. Sobre esta temperatura el polímero tiene más energía y el movimiento molecular le concede flexibilidad, el flujo ocurre solo cuando todos los segmentos cooperan para moverse, por lo que al fluir el poliestireno puede ser fácilmente termoformado y extruido (Brydson, 1999, pp. 43, 44).

La temperatura de transición vítrea (T_g) del poliestireno igual a 100°C , corresponde al inicio de la movilidad de las cadenas del polímero o al punto bajo el cual las moléculas se comportan como un sólido rígido. Este valor puede diferir entre los poliestirenos, debido a la historia térmica que presenten, a su peso molecular y al método de evaluación de las curvas de flujo de calor (Hernández et al., 2000, p. 63).

La Figura 1.2 representa la relación de la temperatura de transición vítrea con el peso molecular, a un tamaño molecular pequeño (M_1) la temperatura de transición vítrea es baja, el polímero se encuentra en un estado vítreo a una temperatura menor de su T_g y sobre ella se comporta como un líquido viscoso. A pesos moleculares altos (M_2), sobre la temperatura de transición vítrea, el polímero pasa por una zona flexible o elástica y luego alcanza la suficiente energía para fluir y se

comporta como fluido viscoelástico. Cuando se alcanza cierto tamaño molecular ya no existe un cambio significativo en la Tg (Brydson, 1999, pp. 43, 44).

Aumentar el peso molecular más allá del peso molecular infinito con el fin de elevar la Tg no es eficaz, porque incrementaría la viscosidad en estado fundido y no permitiría un procesamiento adecuado (Brydson, 1999, p. 174).

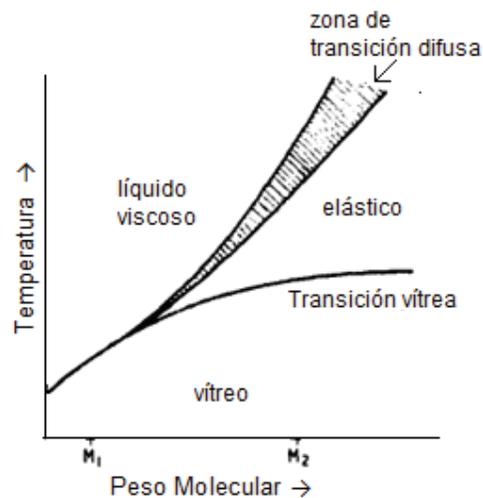


Figura 1.2. Diagrama temperatura versus peso molecular para polímeros amorfos (Brydson, 1999, p.43)

Rieger (1996) comprobó que la temperatura de transición vítrea del poliestireno está en un rango de $107\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, determinada mediante análisis térmico diferencial y calorimetría diferencial de barrido. Verificó que la diferencia entre los valores bibliográficos de 100 °C y el calculado de 107 °C se produce por la velocidad de enfriamiento usada, entre $1\text{ y }20\text{ °C min}^{-1}$ respectivamente; que ocasiona un desplazamiento debido a la masa finita de la muestra y a la corrección de la entalpía (pp. 965, 972).

1.1.3.2 Resistencia a la distorsión térmica

La resistencia a la distorsión térmica se mide para conocer la estabilidad dimensional que tiene el poliestireno como función de la temperatura. Depende de

la forma final que tiene el producto, de las condiciones de producción, de la fuente y duración del calentamiento y del tipo de poliestireno del que está hecho el producto. La temperatura de distorsión al calor disminuye por la adición de polibutadieno u otros aditivos (Jaypee's Medical, 2013, p. 23; Niessner y Wagner, 2013, p. 24).

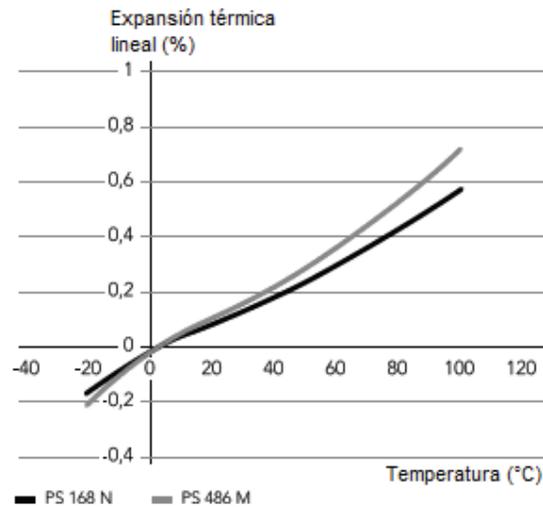


Figura 1.3. Expansión térmica del poliestireno (Niessner y Wagner, 2013, p.24)

Como se demuestra en la Figura 1.3, la temperatura tiene una dependencia lineal con la expansión térmica. Si el producto de poliestireno tiene una tensión interna pequeña y no se encuentra bajo cargas externas, puede ser calentado por un corto tiempo a 15 °C bajo la temperatura de reblandecimiento Vicat sin que se produzca alguna distorsión, considerando que esta temperatura fluctúa alrededor de los 90 °C según el tipo de poliestireno (Niessner y Wagner, 2013, p. 24).

1.1.3.3 Aislante térmico

Como se ha mencionado al EPS se lo considera un aislante térmico, debido a su estructura celular cerrada formada por aire y su baja conductividad térmica. A lo que se suma su naturaleza inerte y su forma, para ser reconocido como empaque de alimentos (Barnetson, 2004, pp. 45, 46).

El EPS de baja densidad tiene una conductividad térmica mayor, entre 0,043 y 0,035 W/m·K, la misma que disminuye con el incremento de la densidad del polímero. Por lo tanto, el EPS tendrá un desempeño térmico adecuado como aislante a densidades de 30 a 50 g/cm³ con una conductividad térmica de 0,033 W/m·K; sobre estos valores la conductividad comienza a incrementar (Barnetson, 2004, p. 46).

1.1.4 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas son una medida indirecta de la estructura de los termoplásticos, permiten solucionar problemas en el procesamiento si se analizan las propiedades del polímero fundido o problemas en el desempeño del producto si se examinan las propiedades del polímero sólido. Pueden ser medidas mientras el material experimenta el cambio de sólido a fundido y viceversa (TA Instruments, 2013, p. 1).

El poliestireno en estado fluido se comporta como un sólido elástico y a la vez como un líquido viscoso, con características de fluido no newtoniano; es decir, que la viscosidad depende no solamente de la temperatura sino también de la velocidad de corte o deformación. Para su procesamiento, las propiedades más importantes a considerar son la viscosidad en solución, peso molecular y la viscosidad en estado fundido; conocidas como las propiedades de flujo (Jaypee's Medical, 2013, p. 23; Niessner y Wagner, 2013, p. 25).

1.1.4.1 Viscosidad en solución

La viscosidad de una solución se considera una herramienta útil para caracterizar estructuralmente a un polímero. Por medio de la viscosimetría se obtendrá una medida relativa del peso molecular de una macromolécula, debido a que la viscosidad de una solución es una función de las dimensiones de las cadenas poliméricas; es decir, si la cadena se extiende en el solvente el polímero se ha

disuelto y por tanto la viscosidad de la solución es mayor que cuando el polímero no se disuelve totalmente y las cadena se enrolla (Romo, 1981, p. 137; Schmitt, 2012, p. 912).

Para determinar el tamaño molecular de un polímero es necesario definir las siguientes funciones viscosimétricas (Romo, 1981, p. 128):

Viscosidad relativa:

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} \quad [1.1]$$

Donde:

η : viscosidad del sistema coloidal (polímero – solvente)

η_0 : viscosidad del solvente puro

También puede ser considerada como la relación entre los tiempos de flujo de la solución y del solvente puro para recorrer un tubo capilar (Schmitt, 2012, p. 912).

Viscosidad específica:

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \eta_r - 1 \quad [1.2]$$

Viscosidad reducida:

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} \quad [1.3]$$

Donde:

c : concentración del polímero (g/100 mL de solución)

Los tiempos de flujo de la solución y del solvente puro se pueden reemplazar por las viscosidades en la expresión [1.2] para obtener la viscosidad específica. Las unidades de la viscosidad reducida son mL/g (Schmitt, 2012, p. 912).

La viscosidad reducida a disolución infinita; es decir, cuando la concentración del polímero tiende a cero y por tanto no existe interacciones intermoleculares, se conoce como viscosidad intrínseca (ASTM D2857, 2007, p. 4):

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \eta_{red} \quad [1.4]$$

Este valor nos proporciona una noción de la habilidad del polímero para aumentar la viscosidad de un solvente y una medida relativa del tamaño del mismo (ASTM D2857, 2007, p. 4).

1.1.4.2 Peso molecular

El peso molecular promedio de un polímero es función del número medio de las unidades constitutivas de repetición y el peso molecular de las mismas. Sin embargo, no se puede establecer un valor fijo para el peso molecular de un mismo polímero debido a diferencias en el método de polimerización, de modo que se obtiene una distribución de pesos moleculares ancha o estrecha según el tipo de macromolécula (Seymour y Carraher, 1995, p. 91).

Las propiedades del polímero son afectadas por el tamaño de la macromolécula, porque si son pequeñas serán más frágiles y menos resistentes. De manera que la dureza, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, la resistencia química y al calor son propiedades dependientes del peso molecular del polímero (Seymour y Carraher, 1995, p. 92).

Como se ha mencionado, el tamaño de las macromoléculas puede ser medido por viscosimetría, para lo cual se utiliza la ecuación de Mark – Houwink como la relación de la viscosidad intrínseca (viscosidad/concentración de la solución), con el peso molecular del polímero (Schmitt, 2012, p. 912):

$$[\eta] = K\overline{M}^a \quad [1.5]$$

Donde:

$[\eta]$: viscosidad intrínseca (mL/g)

K : constante característica del sistema polímero – solvente

a : coeficiente viscosimétrico

\bar{M} : Peso molecular promedio del polímero

Las constantes K y a de un polímero se determinan a partir de una relación lineal entre el $\log [\eta]$ y $\log \bar{M}$, donde a es la pendiente y $\log K$ es el cruce en la abscisa; para lo cual la viscosidad se ha definido experimentalmente y los pesos moleculares han sido previamente obtenidos por un método absoluto. Los valores de la constante K varían entre 10^{-2} a 10^{-4} mL/g y del coeficiente a entre 0,5 y 0,8 para las disoluciones de polímeros dependiendo del solvente (Seymour y Carraher, 1995, p. 75).

Para determinar la viscosidad intrínseca se grafica la viscosidad reducida versus la concentración del sistema polímero – solvente, se extrapola a concentración cero y se obtiene el valor de $[\eta]$. El mismo que se reemplaza en la ecuación [1.5] para el cálculo del peso molecular del polímero (ASTM D2857, 2007, p. 4).

Se han demostrado varias distribuciones de pesos moleculares para el poliestireno que difieren entre bibliografías y que son una función del tipo o grado del polímero analizado dependiendo de su aplicación. De acuerdo a Niessner y Wogner (2013) el peso molecular del poliestireno puede alcanzar un rango entre 150 000 a 400 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ y para el EPS su peso molecular oscila entre 160 000 a 260 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, con base en Shin y Chase (2005). Sin embargo, también se puede encontrar poliestirenos con bajo peso molecular, alrededor de 26 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ (p. 17; p. 209).

1.1.4.3 Viscosidad en estado fundido

La viscosidad en estado fundido representa la velocidad con que las cadenas poliméricas se mueven unas respecto a otras bajo condiciones de temperatura;

esto dependerá de la flexibilidad y el grado de entrelazamiento de la cadena (Brydson, 1999, p. 73).

Esta propiedad es función del peso molecular del polímero; es decir, cuanto mayor sea el peso molecular mayor será la viscosidad en estado fundido, por lo que si el polímero tiene un peso promedio del orden de 10^6 no podrá ser procesado hasta romper las cadenas en pequeñas unidades. Será necesaria más energía para fundir moléculas más grandes (Brydson, 1999, p. 73).

Es de importancia conocer la viscosidad en estado fundido debido a su relación con el procesamiento del polímero, el índice de fluidez (MFI) es una extensión de esta viscosidad, se determina por el método de la norma ASTM D1238 a 200°C y una carga de 5 kg para el poliestireno. La mayoría de poliestirenos comerciales tienen un MFI entre 2 y 20 g/10 min (Jaypee's Medical, 2013, p. 23; Schmitt, 2012, p. 912).

El MFI indica la variación de la viscosidad con la temperatura, si es alto significa que el polímero tiene una viscosidad en estado fundido baja a esa temperatura y viceversa. Por lo tanto, si la viscosidad está directamente relacionada con el peso molecular e inversamente con el MFI, a su vez el peso molecular estará relacionado inversamente con el MFI. Seymour y Carraher (1995) mencionan que el valor de esta propiedad ya es suficiente para comparar la calidad del polímero (Mott, 2006, p. 33; p. 96).

$$\log \eta_0 = K + 3,4 \log_{10} \bar{M} \quad [1.6]$$

Donde:

η_0 : viscosidad aparente cuando la velocidad de cizalla es cero

\bar{M} : peso molecular promedio

K : constante de proporcionalidad para la relación empírica de la viscosidad a cizallamiento cero de un polímero fundido

La ecuación [1.6] expresa la fuerte dependencia que tiene la viscosidad en estado fundido con la temperatura y el peso molecular, se aplica en el poliestireno y otros polímeros lineales. Para polímeros de bajo peso molecular a velocidades de cizallamiento bajas, la viscosidad en estado fundido es proporcional al peso molecular del polímero (Brydson, 1999, p. 437; TA Instruments, 2013, p. 2).

En esta región las moléculas tienen un comportamiento no Newtoniano, se enredan más rápido de lo que se orientan. Polímeros con pesos moleculares altos tienden a comportarse más como fluidos no Newtonianos que aquellos con menor peso molecular (Brydson, 1999, p. 169).

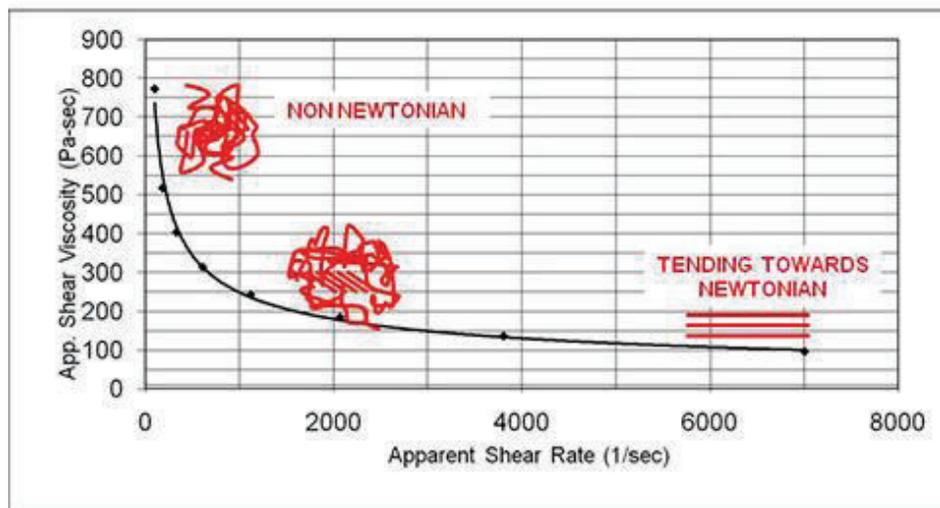


Figura 1.4. Perfil de velocidad de cizallamiento en función de la viscosidad de cizalla (Fimmtech Inc, 2015)

Altas velocidades de cizallamiento vuelve menos viscoso al polímero y la velocidad de orientación aumenta. Una vez alcanzado un valor dado de velocidad de cizallamiento, extremadamente alto, la mayoría de moléculas están alineadas y el incremento en la velocidad de inyección o extrusión no afecta más a la viscosidad, el polímero tienden a comportarse como un fluido Newtoniano. La Figura 1.4 representa lo anteriormente expuesto (Brydson, 1999, p. 169).

Cuando la viscosidad en estado fundido cae debido al aumento en la velocidad de cizallamiento se produce el efecto de adelgazamiento de cizalla, este

comportamiento es el más importante en el procesado de polímeros porque acelera el flujo del material y en consecuencia reduce el consumo de energía y la generación de calor durante el procesamiento. Este fenómeno depende del material y la polidispersidad, los polímeros con una distribución de peso molecular amplia tiende a fluir más que aquellos que tienen una distribución estrecha con el mismo peso molecular promedio, lo que es relevante para la inyección y extrusión (TA Instruments, 2013, p. 2).

1.1.5 PROPIEDADES QUÍMICAS

La solubilidad de un polímero en determinados solventes depende de las fuerzas intermoleculares: fuerzas de dispersión, fuerzas dipolares y puentes de hidrógeno. Si la interacción entre las moléculas de los componentes es igual o superior a la interacción entre las moléculas de cada componente se producirá la disolución, caso contrario solo las moléculas similares se agruparán. Por lo que, se establece como regla general que las similitudes estructurales y químicas favorecen la solubilidad (García, 2009a, p. 3; Yau, Kirkland y Bly, 1979, pp. 210, 212).

En consecuencia un polímero no polar se disolverá más en solventes no polares y un polímero polar se disolverá más en solventes polares. Para conocer la habilidad de los solventes para disolver un polímero, es necesario determinar la contribución de cada fuerza intermolecular utilizando los parámetros δ_v y δ_h , que servirán en la construcción del diagrama del grado de solubilidad representado en la Figura 1.5 (García, 2009a, p. 3; Yau et al., 1979, p. 215):

$$\delta_v = (\delta_d^2 + \delta_p^2)^{1/2} \quad [1.7]$$

Donde:

δ_v : parámetro de solubilidad

δ_d : fuerzas de dispersión

δ_p : fuerzas dipolares

δ_h : puentes de hidrógeno

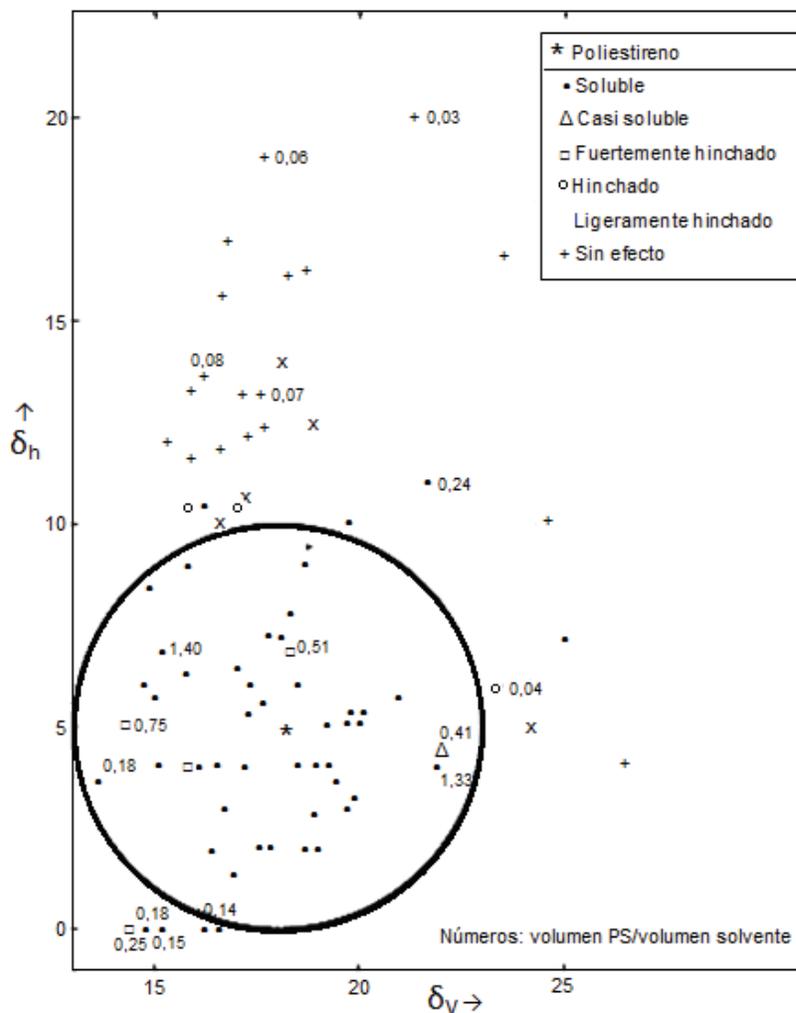


Figura 1.5. Solubilidad del poliestireno en varios solventes
(Yau et al., 1979, p.215)

Los valores de las fuerzas de dispersión y dipolares para calcular el parámetro de solubilidad δ_v , y el valor de los puentes de hidrógeno δ_h se encuentran bibliográficamente tabulados según el tipo de solvente (Yau et al., 1979, pp. 216 - 219).

En este diagrama se representa la interacción entre el polímero y un número de solventes, por medio de la región de solubilidad, que es simbolizada como un círculo cuyo centro está dado por las coordenadas (δ_v, δ_h) del polímero. En dicha región la solubilidad generalmente disminuye conforme la distancia al centro

incrementa, como regla general, el poliestireno es soluble en solventes que cumplan la siguiente relación (Yau et al., 1979, p. 216):

$$\sqrt{(\delta_v - 18)^2 + (\delta_h - 5)^2} < 5 \quad [1.8]$$

Donde:

5: radio de la región de solubilidad

De modo que, el poliestireno es disuelto por hidrocarburos con parámetros de solubilidad semejantes, como el benceno, tolueno y etilbenceno, por hidrocarburos clorados como el tetracloruro de carbono, cloroformo y o-diclorobenceno, por algunas cetonas excepto la acetona, ésteres y algunos aceites. Alcoholes, glicoles, hidrocarburos saturados y algunos ácidos no afectan al poliestireno. Por lo tanto, tiene una resistencia química razonable (Brydson, 1999, pp. 433, 435).

El efecto de los disolventes depende del tiempo y temperatura de exposición, la concentración y combinación de los reactivos; también del tipo de poliestireno, tensiones internas y tensiones externas a las que es sometido. Podrían causar fisuras y agrietamientos, hasta descomposición química en ciertos casos; por ejemplo, en el HIPS el agrietamiento sucede cuando el solvente ingresa en la interfase entre las partículas de caucho y el poliestireno. (Brydson, 1999, p. 435; Jaypee's Medical, 2013, p. 23).

1.1.6 PROPIEDADES ÓPTICAS

Dada la naturaleza amorfa del poliestireno tiene una alta transmisión luminosa, alrededor del 90% en la región de la radiación visible (400 – 800 nm), por lo que es un material transparente a temperatura ambiente. Sin embargo, puede tener apariencia opaca si contiene partículas de caucho, dependiendo de la proporción en la que se encuentren. El brillo del polímero también varía entre el GPPS y el

HIPS, pero si las partículas de caucho son más pequeñas el poliestireno tiene alto brillo (Jaypee's Medical, 2013, p. 23; Niessner y Wagner, 2013, p. 26).

Puede existir amarillamiento como efecto de la degradación por acción de la luz solar, principalmente por la radiación UV en el rango de 300 – 400 nm; es decir, que el poliestireno puede fotooxidarse de manera que afecta su apariencia y disminuye sus propiedades mecánicas, como la elongación a la ruptura y la resistencia al impacto. El envejecimiento se favorece por la longitud de onda absorbida, el contenido de monómero y la presencia de trazas de sulfuro. (Brydson, 1999, p. 435; Jaypee's Medical, 2013, p. 24).

Las transformaciones originadas por la exposición a la radiación UV no son relevantes dependiendo la aplicación a la que se destina el poliestireno. Por ejemplo, si es usado como empaque no se considera un cambio significativo debido al corto tiempo de vida que tiene en esta función. En cambio, en el ámbito de la construcción su tiempo de vida es más largo, pero es menos probable la exposición del material a los rayos UV ya que se lo puede encontrar como panel recubierto (Barnetson, 2004, p. 46).

1.2 RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

El desarrollo económico sumado a un rápido crecimiento poblacional e industrial constituye un desafío para las ciudades en lo que a la generación de residuos sólidos respecta, no solo porque el espacio en los rellenos sanitarios es limitado sino también porque su incineración es costosa. El aumento en el consumo de los plásticos implica la búsqueda de un tratamiento de reciclaje de sus desechos, que permita convertirlos de una amenaza ambiental a un recurso para la industria, solucionando este problema (Poletto et al., 2010, p. 779).

Principalmente los plásticos son el material de mayor consumo en el sector del empaque, lo que a su vez implica un gran volumen de residuos con baja biodegradabilidad desechados al ambiente. Uno de los materiales ampliamente

usado como embalaje es el EPS; es ligero, tiene una buena estabilidad dimensional y bajo costo. De modo que, el consumo global de este poliestireno ya excede los 3 millones de toneladas con un incremento del 6% al año (Achilias et al., 2009, p. 450; Sekharan et al., 2012, p. 221).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Nassar et al. (2009) manifiesta que alrededor del 0,6% de los residuos sólidos en ese país, corresponden a empaques de poliestireno para comida y para protección; por lo que sus residuos causan contaminación ambiental. Después de su corto tiempo de vida, los desechos de EPS terminan en rellenos o son incinerados (p. 418; Sekharan et al., 2012, p. 221).

El peso ligero del EPS es una ventaja en el ámbito del empaque; pero este aspecto resulta ser una complicación en el proceso de reciclaje debido a la dificultad de transporte que implica este desecho voluminoso. Como indica Samper et al. (2008), un camión de residuos con una capacidad de 70 m³ sólo podría transportar entre 700 - 1700 kg de EPS, lo que implica un elevado costo de transporte hacia los lugares de recuperación (Barnetson, 2004, p. 51).

Sin embargo, el EPS tiene gran potencial para ser reciclado debido a que existe en grandes cantidades y la separación de otros residuos es simple por su baja densidad y fácil identificación. Adicionalmente, la industria ha desarrollado equipos para la compactación y densificación del EPS, de modo que la ejecución de diferentes técnicas de reciclaje sea viable con el fin de solucionar el problema ambiental que representa. Es recomendable que su reprocesamiento se realice cerca de los sitios de recolección (Acierno et al., 2009, p. 13, Barnetson, 2004, p. 51).

En el proceso de reciclaje los desechos de EPS pierden su característica de espuma, por lo que son usados en forma sólida para manufacturar juguetes, artículos de oficina, madera plástica, recipientes y hasta EPS nuevamente. Si los desechos son fraccionados pueden ser usados en la construcción, procesos de floculación como sustrato y la obtención de composites de fibras naturales,

carbonatos y nanopartículas con buenas propiedades mecánicas (Maharana et al., 2007, pp. 729, 730; Poletto et al., 2010, p. 779).

1.2.1 RECICLAJE MECÁNICO

El reciclaje mecánico del EPS consiste en la reducción de tamaño de sus desechos por métodos físicos de pulverización, compactación o densificación. Una vez que el EPS ha perdido su volumen puede ser implementado como materia prima para el moldeo de productos cotidianos hechos con poliestireno o producción de materiales de construcción. En la industria es considerado una técnica factible a gran escala, prácticamente limpia y de bajo costo (Acierno et al., 2009, p. 13; Samper et al., 2008).

Una forma de eliminar el aire y en consecuencia el volumen de los desechos de EPS consiste en pasar los residuos entre dos cilindros giratorios calentados a 100 °C. El material que sale continuamente del equipo es triturado en un molino para que pueda ser reprocesado por los procesos tradicionales de extrusión e inyección (Samper et al., 2008).

La compactación de los desechos de EPS se realiza posterior a la trituración del material en un molino de cuchillas, donde se obtienen escamas que son moldeadas por presión y calentamiento, produciendo un bloque sólido aproximadamente 40 veces más pequeño y con una densidad 25 veces mayor que el EPS alimentado a la trituradora. Este residuo podrá ser transportado fácilmente hacia los botaderos donde ocupará menor espacio (Poletto et al., 2010, pp. 780, 783).

El bloque de residuos de EPS compactado puede ser molido para procesarlo en una extrusora y producir un material compuesto. De esta manera se fabrica la madera plástica que es una mezcla de aserrín con los desechos de EPS. Se trabaja en un perfil de temperatura entre 160 y 190 °C para no degradar los

desechos de la madera y la compactación se realiza a 130 °C para evitar la degradación del poliestireno (Poletto et al., 2010, p. 780).

También se puede convertir los desechos de EPS en un material de relleno para manufacturar nuevamente empaques de EPS. Los residuos son triturados y posteriormente se tamizan para obtener un tamaño de partícula apropiado, que es la base para el tamaño de las perlas de EPS virgen con las que serán mezclados para el proceso de moldeo. Los desechos triturados pueden ser usados para la producción de concreto y ladrillos ligeros como una alternativa opcional (Acierno et al., 2009, p. 13).

1.2.2 RECICLAJE QUÍMICO

El objetivo de este reciclaje es recuperar el monómero de estireno para reusarlo en el procesamiento de poliestireno, este producto tendrá las mismas propiedades mecánicas como si fuera procesado con estireno virgen. El reciclaje químico permite la depolimerización del polímero o una degradación del poliestireno en otros materiales secundarios valiosos (Kan y Demirboğa, 2009, p. 2995).

El reciclaje químico puede desenvolverse como una descomposición catalítica de los desechos de poliestireno a 300 – 450 °C en presencia de una atmósfera de nitrógeno, clorofluorocarbono, propano o similares. El catalizador es un óxido ácido o básico como Na_2O , MgO , CaO , BaO , K_2O , o $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; utilizado para obtener el monómero de estireno a una temperatura relativamente baja con alta selectividad (Maharana et al., 2007, p. 731).

En la degradación catalítica del poliestireno en estireno, incluyendo el monómero y el dímero, se ha considerado a los óxidos metálicos a base de hierro como catalizadores efectivos; sin embargo, se ha estudiado que el óxido BaO alcanza una conversión del 90% cuando la descomposición ocurre a 350°C y el tectosilicato conocido como clinoptilolita consigue una selectividad del 99%, obteniéndose estireno como producto principal y etilbenceno como segundo

producto. El tiempo de contacto es un elemento relevante en la distribución entre el monómero y etilbenceno (Maharana et al., 2007, p. 731).

Los solventes supercríticos como el benceno, tolueno, xileno, etc. en un rango de 310 – 370°C y 6.0 MPa, también han sido considerados para depolimerizar el poliestireno en monómero, dímero y otros productos. Este proceso consiste en una reacción corta con una conversión del 77% si el solvente utilizado es el tolueno (Maharana et al., 2007, p. 731).

La síntesis de los desechos de poliestireno también es un tipo de reciclaje químico. Los residuos de EPS pueden ser sintetizados como derivados sulfonados que pueden ser utilizados como polielectrolitos en operaciones de floculación, su acción puede ser comparada con los polielectrolitos aniónicos comerciales (Maharana et al., 2007, p. 731).

1.2.3 RECICLAJE ENERGÉTICO

El reciclaje energético es visto como una alternativa al reciclaje mecánico, aprovecha el alto poder calórico del EPS, similar al aceite combustible y mayor que el carbón. Por lo tanto, se pretende convertir el contenido energético del EPS en una cantidad sustancial de energía mediante la incineración de los desechos (Barnetson, 2004, p. 53).

Este tipo de reciclaje no es un proceso ambientalmente amigable para el tratamiento de los desechos debido a la generación de emisiones tóxicas provenientes de la incineración. Tomando en cuenta que la estructura del poliestireno posee anillos aromáticos se producen grandes cantidades de hollín e hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos perjudiciales para la salud (García et al., 2009b, p. 1814; López et al., 2013, p. 992).

Sumado a la contaminación, existe la limitación en el equipo y en el proceso. El reciclaje energético se desarrolla en un reactor cónico de lecho fluidizado, equipo

disponible en refinerías; tiene base empírica a causa de los problemas en la heterogeneidad del material, en el craqueo de los diferentes componentes e inconvenientes en la transferencia de calor y masa (Maharana et al., 2007, p. 732).

El cracking térmico de los desechos de EPS se produce a 450 – 550 °C y se usan catalizadores ácidos para obtener mayor selectividad. Sin embargo, la formación de coque, favorecida por la naturaleza aromática del estireno y su alta relación entre los átomos de carbono e hidrógeno, provocan la rápida desactivación del catalizador. Cabe destacar que este proceso permite separar diferentes fracciones de productos presentes en los polímeros, por lo que recupera el valor químico y petroquímico que poseen los desechos plásticos (Maharana et al., 2007, p. 732).

Las plantas de incineración son una opción aceptable para el tratamiento de los desechos de EPS que no pueden ser reciclados en otra forma. Siempre y cuando cuenten con regulaciones estrictas y sistemas de control adecuados para que el funcionamiento de estas plantas no produzca efectos adversos en el ambiente (Barnetson, 2004, p. 53).

1.2.3.1 Pirólisis por microondas

Se trata de una nueva técnica de descomposición de residuos inducida por la interacción de un metal como el aluminio y la radiación microondas, lo que provoca altas temperaturas que excitan las moléculas de los desechos para obtener un 88 % de fracción líquida, 9 – 10 % de fracción gaseosa y carbón residual. La velocidad en que se da la reacción y su rendimiento depende del tamaño y la forma de los residuos y de la antena en el reactor (Hussain et al., 2012, p. 145).

El proceso se efectúa dentro de un horno microonda, equipado con un reactor cilíndrico de barro con tapa de vidrio y tubo lateral para la destilación de los

productos, rodeado de una bobina de aluminio que sirve como antena y medio conductor del calor. La radiación es aplicada en pulsaciones de 2 minutos durante 10 minutos. La fracción líquida es recopilada por trampas frías, contiene benceno y otros aromáticos policíclicos y anillos aromáticos condensados. Existe emisión de gases olefínicos y parafínicos (Hussain et al., 2012, pp. 146, 149).

Esta técnica se efectúa en tiempo corto, permite obtener productos líquidos en grandes cantidades que pueden ser utilizados como combustibles y ofrece un procedimiento barato para implementarlo a escala industrial (Hussain et al., 2012, p. 149).

1.2.4 OTRAS TÉCNICAS

1.2.4.1 Disolución

La disolución se propone como un sistema para reducir de tamaño los desechos de EPS, por lo que es considerada por Kan y Demirboğa (2009) y Maharana et al. (2007) como una técnica de reciclaje mecánico; sin embargo, también ha sido reconocida por otros autores, como un proceso del reciclaje químico cuando se habla de la disolución – precipitación y que es aplicado después del reciclaje mecánico. De modo que, en este trabajo se ha preferido clasificarla como otra técnica de reciclaje para el EPS (Achilias et al., 2006; p. 2995; p. 730).

El proceso de disolución de los desechos de EPS se resume como la recuperación del poliestireno en su forma sólida por medio de la precipitación selectiva de la suspensión polimérica, de esta manera se obtiene el polímero sin alteración de sus propiedades. Con esta técnica se reduce el tamaño del EPS en más de 100 veces, al eliminar todo el aire que contiene su estructura sin degradación de las cadenas poliméricas (García et al., 2009b, p. 1814; Maharana et al., 2007, p. 730).

Aunque no es un método ampliamente aceptado por la industria se han desarrollado una serie de procedimientos patentados. El principal reparo es la utilización de solventes orgánicos que no son considerados ambientalmente amigables, por lo que se busca reemplazar los compuestos orgánicos por solventes verdes (Maharana et al., 2007, p. 730).

Adicionalmente, se ha propuesto la utilización de solventes reusables tales como el propil bromuro o mezclas de alcohol isopropílico; es decir, que tienen un bajo punto de ebullición y alta velocidad de vaporización lo que hace fácil su reutilización si el proceso se realiza en un sistema cerrado. El uso de dialquil carbonatos y esteres dibásicos también son considerados solventes para el EPS (Maharana et al., 2007, p. 730).

El uso de solventes verdes en la disolución de los residuos de poliestireno abarata los costos del reciclaje, por lo general son productos extraídos de cítricos, tales como aceites esenciales; d-limoneno, p-cimoneno, terpeno y felandreno. Estos solventes no producen degradación del peso molecular durante el proceso a menos que la disolución se desarrolle a altas temperaturas (García et al., 2009a, p. 2).

Las principales ventajas del reciclaje por disolución – precipitación son: 1) los desechos de EPS después del reciclaje se presentan como polvo o granos de poliestireno adecuados para ser reprocesados, 2) la contaminación a causa de los aditivos o sustancias insolubles que pueden contener los residuos pueden ser removidas por filtración, 3) si la disolución no se desarrolla bajo temperatura no existe degradación y 4) el poliestireno reciclado tiene una calidad competitiva con el poliestireno virgen (Achilias et al., 2009, p. 450).

Una aplicación de esta técnica trasciende hasta el campo de las nanofibras, que combina el reciclaje por disolución y el electrohilado para producir filtros con una eficiencia de separación entre el 68 al 88 %. Los desechos son disueltos en tetrahidrofurano, dimetilformamida, dimetilacetamida o de preferencia solventes verdes para después de una separación entre el solvente y el polímero, se

electrohila obteniéndose nanofibras con un diámetro alrededor de 300 a 900 nm (Shin y Chase, 2005, pp. 209 - 211).

1.2.4.2 Reciclaje térmico

El tratamiento térmico del EPS busca mejorar las propiedades del poliestireno tales como la densidad, la conductividad térmica y la resistencia a la compresión. Lo cual puede ser favorable para la producción de concreto modificado con residuos de EPS que no presente problemas de adhesión y aumente su vida útil. La finalidad principal de esta técnica es convertir los desechos en un producto reduciendo la cantidad que se dispone en los rellenos (Kan y Demirboğa, 2009, p. 2995).

Los desechos de EPS son previamente triturados y en un horno se los somete a una temperatura próxima a 130 °C, no se utiliza altas temperaturas debido a que el objetivo es que el polímero pase a un estado plástico y se encoja sin dejar de ser bastante rígido. El tiempo de calentamiento no supera los 15 minutos, obteniéndose una reducción del volumen de 10 a 20 veces el tamaño original y un aumento del 2070 % de la densidad (Kan y Demirboğa, 2009, pp. 2996 - 2999).

No es una técnica frecuentemente usada debido a que es una técnica lenta y que demanda mucha energía para manejar las grandes cantidades de desechos de EPS. Sin embargo, el reciclaje térmico puede ser considerado una alternativa para la reducción de tamaño del EPS (Barnetson, 2004, p. 52).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) RECOLECTADO

La caracterización del EPS recolectado se efectúa con el fin de establecer parámetros comparativos entre el material que va a ser reciclado y el producto después de su reciclaje. Por lo tanto, es de interés conocer la estructura, composición y propiedades térmicas de los desechos de EPS que han sido recolectados.

El estudio inició con la recolección durante 2 meses de los desechos de EPS, procedentes de un local comercial de electrodomésticos ubicado en el sector de Carcelén. Al cabo de este periodo se consiguieron alrededor de 14 kg en empaques de EPS, que se fragmentaron hasta un tamaño de partícula menor o igual a 4 mm con un molino de cuchillas Shini modelo SG – 2348E. De esta manera se compactó el volumen característico que tienen los desechos para facilitar su manejo en el proceso.

A este material fragmentado se lo homogeneiza mediante el método de cuarteo, con el fin de obtener una muestra que represente las propiedades de todo el lote para la caracterización correcta de los desechos de EPS recolectados. En la Figura 2.1 se visualiza el procedimiento realizado.

De modo que se procedió a ubicar los desechos molidos a manera de pila y con la ayuda de una pala se mezclaron los residuos hasta tener un montículo en forma de “pastilla”. Este montículo se dividió en cuatro partes de las cuales se toman dos para repetir el cuarteo; de esta segunda homogeneización se obtuvo la muestra representativa de los desechos de EPS recolectados.



Figura 2.1. Homogeneización de los desechos de EPS fragmentados

La caracterización de los residuos de EPS recolectados, previamente preparados, se realizó mediante las siguientes técnicas:

Espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier FTIR: se obtuvo las bandas de absorción de los grupos funcionales que conforman la estructura del material recolectado. El análisis se efectuó por el método de HATR (Horizontal Attenuated Total Reflection) en un espectrofotómetro infrarrojo Perkin Elmer modelo Spectrum One.

Para el efecto, se formó una placa de EPS molido siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM D5576 – 00 (2013). Se usó la prensa calefactada Carver modelo 2112 – 2, 400 °C y 7 000 psi, 5 °C y 500 psi; a una presión aproximada de 3000 psi durante 60 segundos entre capa y capa de EPS que formó la plancha, no fue necesario utilizar temperatura para compactar la muestra.

Viscosimetría: la viscosidad fue utilizada como una medida del peso molecular del material recolectado molido. Se utilizó el procedimiento de la norma ASTM D2857 – 95 (2007) con viscosímetro de vidrio Cannon-Fenske Routine, para la determinación de la viscosidad intrínseca y por medio de la ecuación [1.5] se calculó el peso molecular del poliestireno recolectado.

El proceso experimental se basa en la medición del tiempo en que se demora un volumen dado de solución de polímero en recorrer el tubo capilar y su comparación con el tiempo de flujo del solvente puro. Para lo cual se realizaron soluciones de 0,08; 0,06; 0,04 y 0,02 g/100 mL de EPS en metil etil cetona grado reactivo, se midió el tiempo de flujo de cada una en un baño térmico a 25 °C. Adicionalmente, fue necesario determinar la densidad de cada solución para calcular la viscosidad relativa y continuar el proceso hasta obtener la viscosidad reducida e intrínseca (Schmitt, 2012, p. 912).

Caracterización térmica: se evaluó la temperatura de transición vítrea del EPS recolectado por medio de calorimetría diferencial de barrido (DSC) de acuerdo a la norma ASTM D3418 – 12 (e1), y la temperatura de descomposición térmica mediante el análisis termogravimétrico (TGA) por la norma ASTM E1131 – 08 (2014), que además proporciona información acerca del contenido de materia inorgánica que compone al EPS recolectado.

Se empleó un calorímetro diferencial de barrido Netzsch modelo DSC 204 F1 Phoenix, 700 °C, 0,1 °C; a una velocidad de 20 °C/min hasta alcanzar 200 °C en atmósfera de nitrógeno con celdas de aluminio de 25 µL y el análisis del termograma se realizó con el programa Netzsch Proteus. Para el TGA se utilizó el analizador termogravimétrico Shimadzu modelo TGA – 50, 1 000 °C, 0,1 °C y 0,01 mg; usando una velocidad de calentamiento de 20 °C/min hasta 800 °C en atmósfera de nitrógeno.

2.2 DESARROLLO DEL PROCESO DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) POR DISOLUCIÓN – PRECIPITACIÓN

El proyecto propuesto plantea el diseño del proceso de reciclaje de EPS a partir del método de disolución – precipitación que garantice la obtención de un producto apto para la comercialización y reprocesamiento, que implique una

solución a la disposición del EPS postconsumo en el medio ambiente. Por lo tanto, en el desarrollo del proceso se evaluaron distintas proporciones de EPS en la disolución y de agente precipitante en la precipitación, para recuperar poliestireno con menor contenido de impurezas.

Con base en la metodología descrita en la patente inventada por Notari y Rivetti (2005), se estableció el procedimiento de la disolución – precipitación con la diferencia que se lo realizó a temperatura ambiente y presión atmosférica. Las condiciones para el proceso fueron establecidas por medio de pruebas preliminares, usando como referencia rangos de experimentación de los procedimientos propuestos en Notari et al. (2005) y Achilias et al. (2009). Dichas pruebas determinaron operaciones adicionales que mejoraron el proceso.

Para la disolución se seleccionó el solvente considerando la relación de solubilidad del poliestireno determinada por la ecuación [1.8], su cálculo se adjunta en el Anexo I. Además de la relación de solubilidad, Cistone et al. (2003) hace referencia a que un buen solvente debe tener un bajo punto de ebullición y una alta velocidad de evaporación, por lo que después de analizar las propiedades físicas del tetrahidrofurano fue seleccionado como el solvente para el reciclaje.

En Notari et al. (2005) se menciona que los glicoles son disolventes utilizados para la precipitación selectiva del poliestireno, de modo que se escogió al etilenglicol como agente precipitante.

2.2.1 MÉTODO DISOLUCIÓN – PRECIPITACIÓN

El EPS homogeneizado se disolvió en tetrahidrofurano (THF) Fisher Scientific grado HPLC, variando el contenido de polímero en las proporciones de 10, 20, 30 y 40 %; los componentes de la solución se pesaron en la balanza Mettler Toledo modelo PG 5002-S, 5 100 g, 0,01 g. Para establecer los porcentajes a ensayar se observó la viscosidad que presentaban las diferentes soluciones en las pruebas

preliminares. La disolución se desarrolló bajo agitación constante con el agitador mecánico Talboys modelo 102; el proceso como tal se puede apreciar en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Proceso de disolución del EPS recolectado

En cada porcentaje de mezcla se recuperó el poliestireno disuelto por precipitación, como se representa en la Figura 2.3, empleando como agente precipitante al etilenglicol (EG) grado técnico, el mismo que se adicionó lentamente y bajo agitación en las siguientes relaciones volumétricas: 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG. Al término de la adición se dejó el sistema en reposo por pocos minutos, de manera que el polímero precipitado ascienda por diferencia de densidades en la solución THF – EG, facilitando su separación por filtración.

Preliminarmente, se lavó con agua al polímero precipitado y se secó a 80 °C durante 12 horas en la estufa Venticell, con el fin de eliminar el remanente de la solución THF - EG presente. Sin embargo, se desarrollaron otras condiciones de tratamiento para el precipitado después de realizar pruebas que mejoraron su pureza.

De modo que, dada la consistencia del polímero precipitado fue necesario secar durante 1 hora a 100 °C para que endurezca y sea fácil su reducción de tamaño en el molino de cuchillas Thomas – Wiley modelo 4. Esta fragmentación hasta 2 mm deshace los poros de la estructura del precipitado que albergan restos de la solución THF – EG. En la Figura 2.4 se representa la apariencia que tiene el polímero en el proceso.



Figura 2.3. Proceso de precipitación del poliestireno

Una vez molido el precipitado se lavó con isopropanol Fisher Scientific grado reactivo, durante 1 hora y con agitación magnética, esta operación se realizó dos veces para cada muestra con el fin de que el alcohol arrastre al etilenglicol remanente. Posteriormente se secó el polímero lavado a 100°C durante 11 horas para evaporar restos de la solución alcohol - EG contenidos en el polímero molido.

Finalmente, con la información obtenida en la experimentación descrita y la caracterización del poliestireno recuperado, se determinaron las condiciones adecuadas de concentración de EPS en tetrahidrofurano para la disolución y la proporción de etilenglicol usado para la precipitación, que permitan recuperar un polímero sin contaminantes y con propiedades aptas para el reprocesamiento.

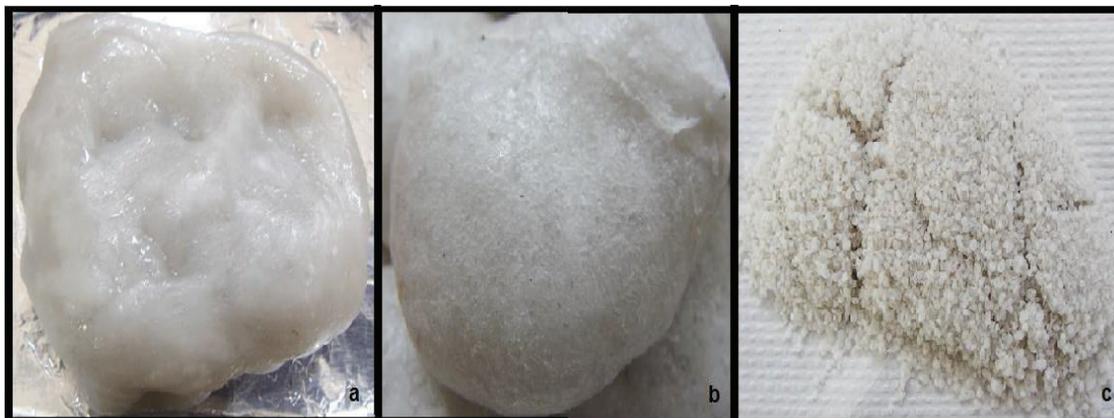


Figura 2.4. Polímero recuperado: **a.** precipitado, **b.** seco y **c.** molido

2.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLÍMERO RECUPERADO

Con la finalidad de comparar las características estructurales, nivel de contaminación y propiedades térmicas del poliestireno recuperado, para de esta manera avalar la calidad del material reciclado, es indispensable la caracterización del polímero obtenido. Con este objetivo se utilizaron las mismas técnicas descritas para el material de partida (EPS):

Espectroscopia Infrarroja por transformadas de Fourier FTIR: permite la caracterización estructural del producto, de manera que se pueda reconocer los movimientos vibratorios a causa de las moléculas que lo conforman y predecir si existen restos de agente precipitante en los polímeros recuperados. Los espectros resultantes son comparados con el estándar bibliográfico de poliestireno, para avalar que el material reciclado presenta los grupos funcionales respectivos.

El análisis se efectuó por el método de HATR en el espectrofotómetro infrarrojo Perkin Elmer modelo Spectrum One. El equipo incluye el programa Spectrum v.302 e IR Tutor como herramientas útiles para la interpretación de espectros.

Dado a que el objetivo es determinar la presencia de algún contaminante, no se puede laminar el polímero por la técnica melt pressing debido a que la temperatura puede eliminar el solvente volátil presente; por lo tanto la muestra

analizada tiene el aspecto que se observa en la Figura 2.4 c. El uso de un mortero permitió pulverizar la muestra de manera que se favorezca el contacto entre el cristal y el espécimen; sin embargo, los gránulos originaron ruido en el espectro por lo que fue necesario aumentar el número de barridos a 100.

Viscosimetría: al igual que en la caracterización del EPS recolectado se usó la viscosidad como un referente del peso molecular, en este caso se determinó el MFI debido a su estrecha relación con la viscosidad y en consecuencia se pudo aproximar el peso molecular de los polímeros. Además, el peso molecular del EPS recolectado es una referencia.

El MFI como una medida de la viscosidad del poliestireno reciclado en estado fundido permitió validar las propiedades que tiene como materia prima para reprocesamiento. Es decir que, mediante el MFI de los productos se comprobó su calidad con base en el MFI de poliestirenos comerciales.

El ensayo se realiza en un plastómetro de extrusión Ceast modelo 6942, como indica la norma ASTM D1238 – 13 a 200 °C y con una carga nominal de 5 kg. Se dispone de la balanza analítica Shimadzu modelo Libror AEL40SM, 42 g, 0,01 mg; para la medición del peso de las muestras que se obtienen en cada análisis y calcular el MFI.

Propiedades térmicas: por medio de termogravimetría (TGA) se obtuvo la temperatura de descomposición de los productos recuperados y el porcentaje de pérdida en peso de algún contaminante que los compone. Usando calorimetría diferencial de barrido (DSC) se determinó la temperatura de transición vítrea de los polímeros.

Para el análisis termogravimétrico se utilizó el equipo TAinstruments modelo Q500; bajo la norma ASTM E1131 – 08 (2014) usando una velocidad de calentamiento de 20 °C/min hasta 800 °C, en atmósfera de nitrógeno. El analizador termogravimétrico no es el mismo que el equipo donde se realizó el TGA del EPS recolectado, debido a problemas técnicos.

Para el DSC se empleó un calorímetro diferencial de barrido Netzsch modelo DSC 204 F1 Phoenix, 700 °C, 0,1 °C; a una velocidad de 20 °C/min hasta alcanzar 200 °C en atmósfera de nitrógeno con celdas de aluminio de 25 µL, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D3418 – 12 (e1). El análisis del termograma se realizó con el programa Netzsch Proteus.

2.2.3 RECUPERACIÓN DEL SOLVENTE Y AGENTE PRECIPITANTE

La recuperación del solvente y agente precipitante empleados es muy relevante, no solo en el marco ambiental, sino también por la reducción en el consumo de reactivos. Por lo tanto, se aprovecha la diferencia significativa entre los puntos de ebullición de los componentes de la solución THF – EG para su separación eficiente y posible reciclo.

Se empleó una columna de fraccionamiento para la destilación de la solución THF – EG obtenida del proceso de disolución – precipitación una vez que se extrajo el polímero precipitado; la temperatura a la que se obtuvo la fracción destilada fue a 54 °C durante 3 horas y media. Al finalizar la operación se midió la cantidad de destilado y residuo recuperados, lo cual permite determinar el rendimiento de la destilación definido por la cantidad de solvente y agente precipitante recuperados en base a la composición de la solución filtrada THF - EG.

Se evaluó la pureza química de los productos de la destilación mediante espectroscopia infrarroja y el índice de refracción. El FTIR permitió la comparación de los espectros obtenidos con los estándares bibliográficos de tetrahidrofurano y etilenglicol para determinar la estructura molecular que tiene tanto el destilado como el residuo de la solución THF – EG.

La relación lineal entre la concentración y el índice de refracción para el sistema binario THF - EG permitió determinar la composición del destilado y el residuo. Se estimó la concentración de tetrahidrofurano y etilenglicol en los productos de la destilación, para lo cual se utilizó la curva de calibración índice de refracción

versus concentración, previamente realizada con estándares de THF – EG de 5, 20, 50, 70 y 90 % de tetrahidrofurano y los compuestos puros. Se empleó el refractómetro de Abbe Bausch/Lomb, 0,0001.

De esta manera se caracterizó y cuantificó la cantidad de solvente y agente precipitante que puede ser recirculada al proceso de reciclaje de EPS, con el fin de promover un proceso más limpio.

2.2.4 RECUPERACIÓN DEL ALCOHOL ISOPROPÍLICO

Con base en las temperaturas de ebullición distintivas de los componentes de la solución alcohol – EG, se separa el isopropanol como reactivo de lavado y el etilenglicol como precipitante; de manera que se reduzca el consumo de alcohol en el proceso gracias a su posible reutilización.

Se recuperó el alcohol isopropílico por medio de destilación fraccionada de la solución filtrada del proceso de lavado, se obtuvo la fracción destilada 72 °C durante 4 horas. El volumen recuperado de los productos de la destilación fue cuantificado.

Al igual que la recuperación anterior, la pureza química del destilado y residuo de la destilación se analizaron por la medición del índice de refracción y espectroscopia infrarroja. Por FTIR se realizó el análisis estructural de los productos de la destilación y con la comparación bibliográfica de los espectros se conocieron los grupos funcionales que conforman al destilado y al residuo.

Se elaboró la curva de calibración índice de refracción versus concentración con estándares de alcohol – EG, para lo cual se midió el índice de refracción de los compuestos puros y de soluciones de 5, 20, 50, 70 y 90 % de alcohol en etilenglicol. A partir de la relación obtenida se estimó la concentración de isopropanol y etilenglicol en el destilado y en el residuo con la medición de los índices de refracción en el refractómetro de Abbe Bausch/Lomb, 0,0001.

2.3 DISEÑO DEL PROCESO DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

Una vez que se evaluaron las condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso de reciclaje que garantizaron un producto menos contaminado y con calidad para el reprocesamiento, es factible realizar el diseño del proceso de reciclaje de EPS por el método de disolución – precipitación.

Se estructuró un diagrama de bloques (BFD) con las etapas del proceso de reciclaje de EPS. En función de las operaciones unitarias que se describen en el BFD, se esquematizaron los equipos que se usará en la planta piloto de reciclaje en un diagrama de flujo (PFD). Se incluye el plano de simbología y nomenclatura utilizadas en equipos y líneas de corriente para mejor entendimiento de los diagramas de proceso y la descripción detallada del procedimiento.

Con base en las importaciones del Ecuador entre enero a julio del 2012, se estableció la capacidad de la planta piloto de reciclaje de EPS como el 10% de las mismas, por lo tanto el diseño se realizó para el tratamiento de 770 kg/día de EPS. Se incorpora al PDF las condiciones a las que se encuentran las corrientes del proceso y su composición, en relación al balance de masa respectivo (Cámara de Industrias de Guayaquil, 2012).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) RECOLECTADOS

3.1.1 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

En la Figura 3.1 se representa el espectro proveniente del análisis por FTIR del EPS recolectado y homogeneizado.

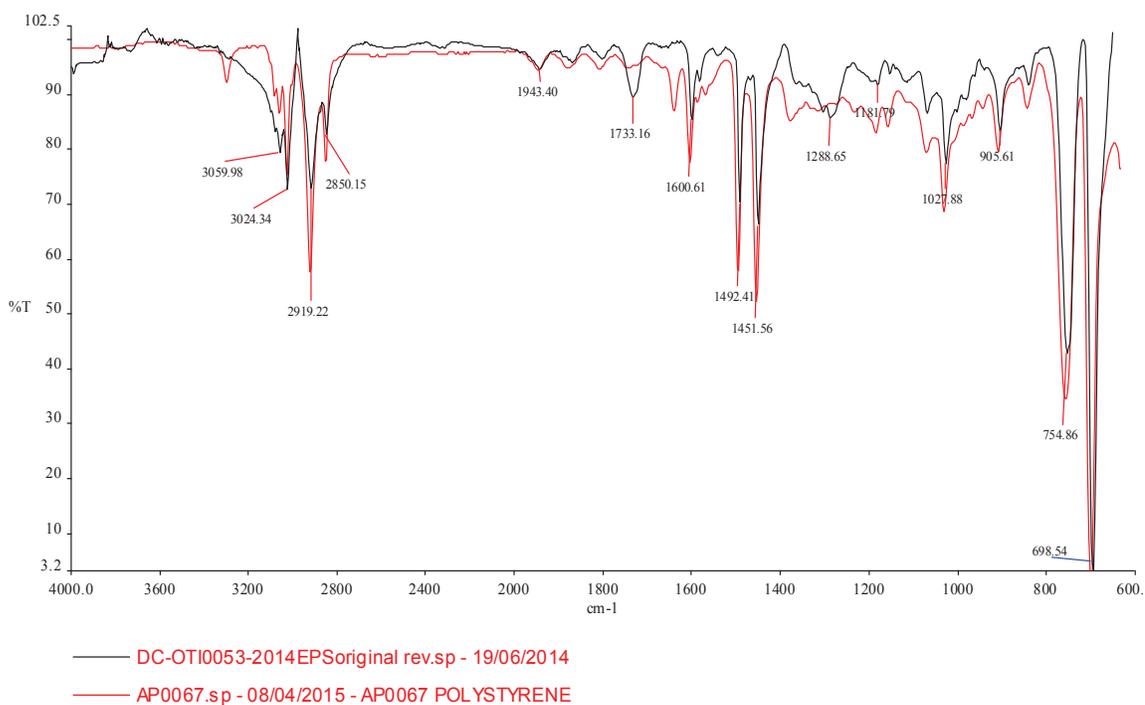


Figura 3.1. Espectro del poliestireno expandido recolectado

El espectro obtenido del análisis de los desechos de EPS recolectados presenta las bandas de $1\ 601\text{cm}^{-1}$, $1\ 492$ y $1\ 452\ \text{cm}^{-1}$, 755 y $699\ \text{cm}^{-1}$; características del poliestireno y de sus modos vibratorios, tal como se describe en la Tabla 3.1. De igual forma, se comprueba que el espectro del EPS recolectado es comparable con el espectro bibliográfico del poliestireno.

Tabla 3.1. Bandas características de la absorción en el infrarrojo del poliestireno

	Frecuencia λ (cm^{-1})	Modo vibratorio
Aromáticos	3 100 – 3 000	Estiramiento del enlace CH – aromático
	~1 601	Estiramiento simétrico del anillo
	~1 494	Estiramiento asimétrico del anillo
	~1 454	Estiramiento lateral del anillo y deformación por tijereteo del CH_2
Poliestireno	~760	Balanceo en fase del hidrógeno con el anillo monosustituido
	~697	Torsión del anillo monosustituido
	~2 924	Estiramiento asimétrico del CH_2
	~2 850	Estiramiento simétrico del CH_2

(Mark, 2007, p.402)

Se señala las zonas de absorción entre $3\,100 - 3\,000\text{ cm}^{-1}$ y $1\,600 - 1\,450\text{ cm}^{-1}$ típicas del anillo bencénico y la región propia del poliestireno entre $760 - 700\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al anillo monosustituido con sus respectivos sobretonos en la región de $2\,000$ a $1\,650\text{ cm}^{-1}$. Además, se evidencia absorción en las bandas de $2\,850$ y $2\,919\text{ cm}^{-1}$ referente a los estiramientos de las moléculas CH_2 .

En la estructura del material recolectado también se distingue absorción en $1\,733\text{ cm}^{-1}$, que se origina por la presencia de carbonilo, debido a la posible descomposición que los residuos de EPS pueden sufrir al ambiente antes de ser recolectados (Stuart, 2004, pp. 133, 194).

La zona aproximadamente entre $1\,400$ y 400 cm^{-1} corresponde a la huella dactilar de la molécula, patrón de frecuencias propias del material que no se analizan debido a su complejidad; sin embargo, es útil en la comparación con el espectro bibliográfico.

3.1.2 VISCOSIMETRÍA

La determinación del peso molecular del material recolectado molido se realizó por medio de la medida de la viscosidad, de tal manera que se calculó la viscosidad reducida para cada disolución de polímero en metil etil cetona con el uso de la ecuación [1.3]. A partir del gráfico viscosidad reducida vs. concentración, se obtuvo la ecuación de la curva para la determinación de la viscosidad intrínseca y con la ecuación [1.5] se calculó el peso molecular del poliestireno recolectado usando las constantes de Mark – Houwink, como se puede observar en el Anexo II.

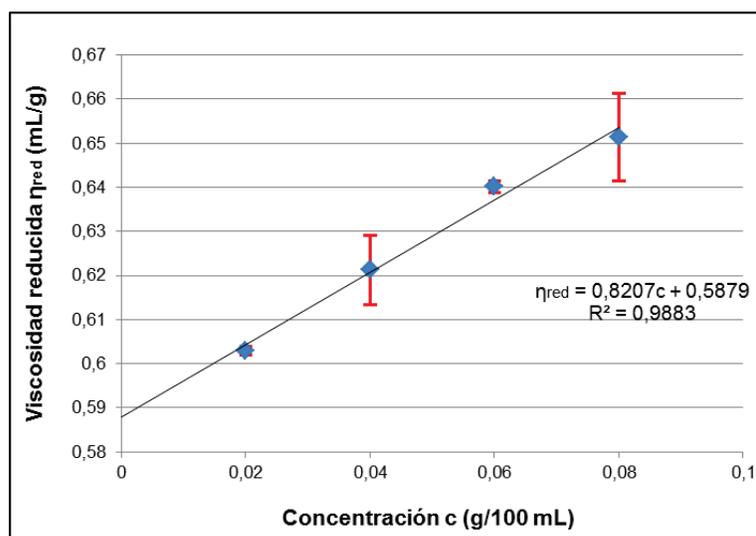


Figura 3.2. Determinación de la viscosidad intrínseca por medio del gráfico η_{red} vs. c

En la Figura 3.2 se representa la ecuación de la curva con la que se determinó la viscosidad reducida de la disolución cuando la concentración del polímero tiende a cero, denominada viscosidad intrínseca; es decir, el incremento de la viscosidad de la solución por molécula de poliestireno es de 0,5879 mL/g. Con este valor se calculó el peso molecular viscosimétrico del EPS recolectado, procedente del empaque de artefactos eléctricos y electrónicos, que es igual a $M_w = 107\ 510\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Dado a que los polímeros son polidispersos este es un valor de referencia, está sujeto a variaciones dependiendo de la fabricación que haya tenido el EPS y a las condiciones que haya estado expuesto antes de ser recolectado; inclusive la polimerización que da lugar al poliestireno antes de su expansión puede variar el peso molecular del producto final.

3.1.3 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Se obtuvo el siguiente termograma a partir de la descomposición de una masa dada de EPS hasta los 800 °C.

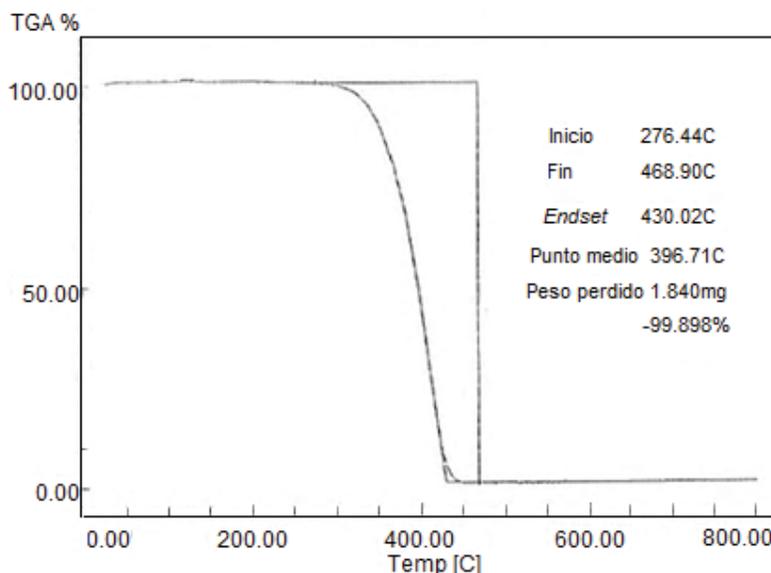


Figura 3.3. Termograma correspondiente al análisis termogravimétrico del poliestireno expandido recolectado

A partir de la Figura 3.3 se puede inferir que la descomposición del EPS recolectado inicia a 276,44 °C hasta que se registra la máxima pérdida de peso a los 430,02 °C, punto de la degradación térmica donde solamente queda materia inorgánica. El EPS recolectado presenta 0,1 % de materia inorgánica y de acuerdo al termograma no existe una descomposición térmica adicional en el poliestireno.

3.1.4 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

Por medio del análisis en DSC se obtuvo el siguiente termograma:

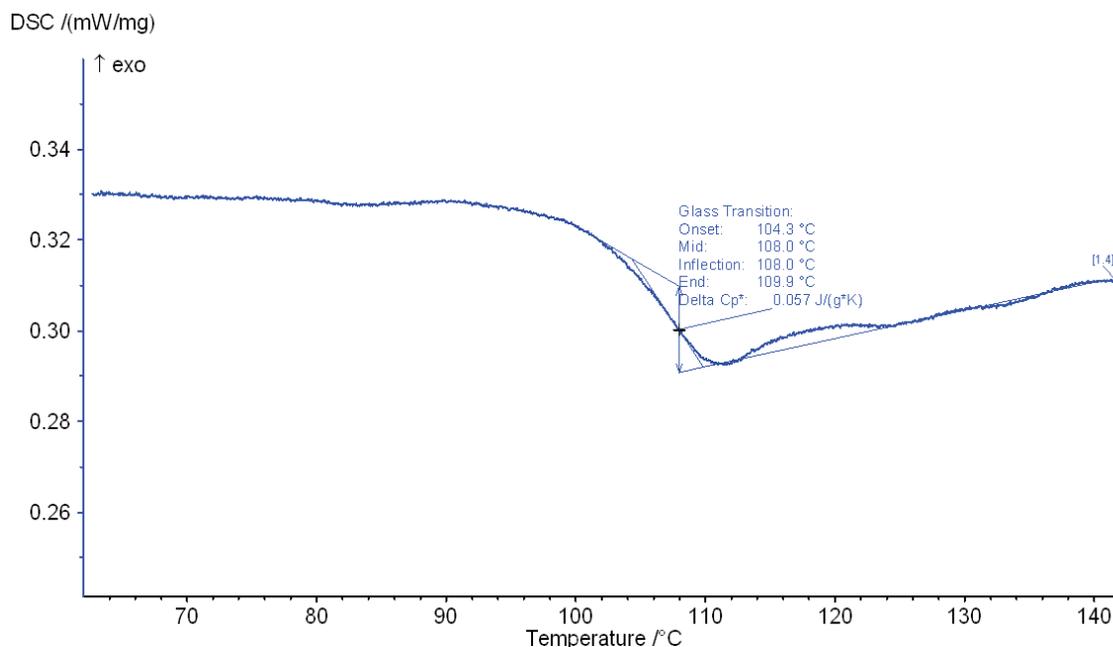


Figura 3.4. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno expandido recolectado

En la Figura 3.4 se representa la zona de transición vítrea del material recolectado, donde se denota que la temperatura de transición vítrea es de 108 °C. Este aumento sobre el valor bibliográfico de la Tg (100 °C) puede ser consecuencia del agente expansor u otros aditivos que se usan en la fabricación del EPS, los mismos que al interactuar con el poliestireno pueden limitar la movilidad de las cadenas proporcionando rigidez y con ello el aumento en la temperatura de transición vítrea (Hernández et al., 2000, p. 63).

Sin embargo, con base en Rieger (1996), quién concluyó en su estudio que la temperatura de transición vítrea del poliestireno está en un rango de 107 °C ± 2 °C, la temperatura de transición vítrea de los desechos de EPS recolectados se encuentra dentro de este rango bibliográfico (p. 965).

3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

3.2.1 CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DEL POLÍMERO RECUPERADO

Todos los espectros han sido realizados por HATR con el fin de analizar la estructura superficial del polímero recuperado. La presentación del producto obtenido a manera de gránulos impide un contacto adecuado entre la muestra y el cristal, por lo que se registró una señal de baja intensidad, siendo necesaria su normalización para reconocer las bandas características del polímero.

El análisis también se mostró sensible a la descompensación atmosférica, por lo tanto en los espectros de los polímeros recuperados se aprecian las frecuencias características del poliestireno y a la vez bandas correspondientes a la humedad y CO₂ en el instrumento, que se amplificaron debido a la normalización. Dichas frecuencias se señalan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Bandas características de la absorción atmosférica en el infrarrojo

Absorción atmosférica	Frecuencia λ (cm ⁻¹)
Agua	sobre 3 500
Fuerte CO ₂	~ 2 300
Débil CO ₂	~ 600

(Stuart, 2004, pp.17, 203)

A continuación se exponen los espectros infrarrojos pertenecientes a los poliestirenos obtenidos por los ensayos del método disolución – precipitación para el reciclaje de EPS. Se presentan por grupo de disolución; es decir, 10, 20, 30 y 40 %.

3.2.1.1 Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 10 % EPS y precipitación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG

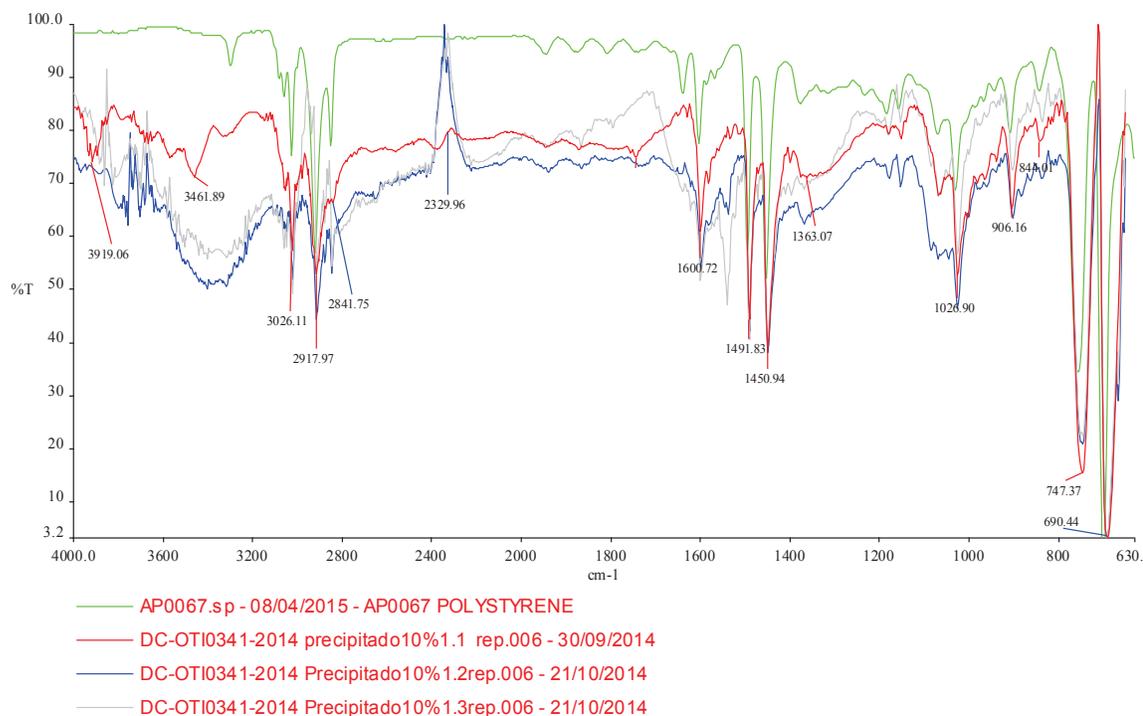


Figura 3.5. Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos disolución 10 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG

En la Figura 3.5, se presentan los espectros de los polímeros recuperados por el método de disolución – precipitación ensayos: 10 % EPS - 1/1 THF/EG, 10 % EPS – 1/2 THF/EG y 10 % EPS – 1/3 THF/EG. Se observa que los tres polímeros recuperados poseen las bandas características del poliestireno, lo cual se corrobora con la información de la Tabla 3.1.

La frecuencia correspondiente al estiramiento entre los enlaces C-H y el anillo aromático se localiza alrededor de 3026 cm^{-1} en los diferentes espectros. Se evidencian los estiramientos simétrico y asimétrico de la molécula de CH_2 cerca de 2918 y 2842 cm^{-1} , respectivamente. La presencia del anillo bencénico se constata por los modos vibratorios existentes en 1601 , 1492 y 1451 cm^{-1} . Con respecto a las bandas representativas del polímero se ubican en 747 y 690 cm^{-1} para los productos recuperados.

En los espectros de los polímeros obtenidos se aprecia la descompensación atmosférica provocada tanto por la absorción de CO₂ como por la absorción de agua. En concordancia con la Tabla 3.2, se comprueba la presencia de humedad en el instrumento por las frecuencias de 3 919 y 3 462 cm⁻¹, especialmente, al momento de realizar los ensayos 10 % EPS – 1/2 THF/EG y 10 % EPS -1/3 THF/EG. El CO₂ se hace presente en la frecuencia cercana a 2 330 cm⁻¹ con una evolución positiva.

3.2.1.2 Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 20 % EPS y precipitación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG

Los espectros de los polímeros recuperados por el método de disolución – precipitación a las condiciones: 20 % EPS - 1/1 THF/EG, 20 % EPS – 1/2 THF/EG y 20 % EPS – 1/3 THF/EG se detallan en la Figura 3.6. Su análisis se realiza de acuerdo con la información de la Tabla 3.1.

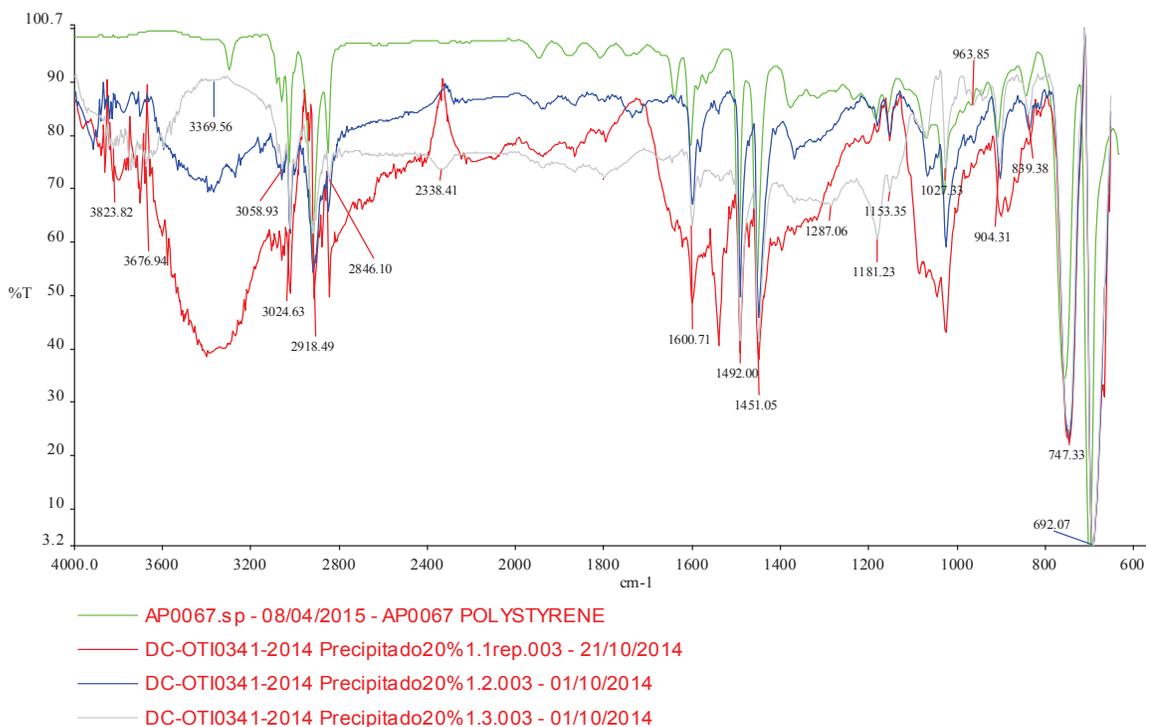


Figura 3.6. Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 20 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG

Los movimientos vibratorios propios de la absorción del anillo aromático se observan alrededor de 3 059 y 3 025 cm^{-1} , así como en la zona de 1 601, 1 492 y 1 451 cm^{-1} . Además, la molécula de CH_2 se muestra con estiramientos en las frecuencias de 2 919 y 2 846 cm^{-1} . Finalmente, para confirmar que los tres polímeros recuperados corresponden a la estructura del poliestireno, se considera la absorción en 747 y 692 cm^{-1} como el balaceo y flexión del anillo monosustituido.

Se visibiliza absorción atmosférica, con respecto a la humedad, se distinguen diferentes frecuencias que conforman una banda ancha aproximadamente en 3 370 cm^{-1} y con relación a la descompensación por CO_2 se observa una banda cercana a 2 338 cm^{-1} .

3.2.1.3 Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 30 % EPS y precipitación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG

En la Figura 3.7 se aprecia los espectros de los polímeros recuperados por el método de disolución – precipitación ensayos: 30 % EPS - 1/1 THF/EG, 30 % EPS – 1/2 THF/EG y 30 % EPS – 1/3 THF/EG. Su análisis se realiza de acuerdo con la información de la Tabla 3.1.

Las bandas en los espectros de los polímeros recuperados que corresponden a la presencia del anillo aromático aproximadamente están en 3 059, 3 025, 1 601, 1 492 y 1 451 cm^{-1} . Dado a que en la estructura del poliestireno aparece la molécula de CH_2 , esta tiene protagonismo en los espectros en 2 917 y 2 850 cm^{-1} . Además, como característica del polímero se hallan las frecuencias de 747 y 694 cm^{-1} pertenecientes a los movimientos vibratorios del anillo monosustituido.

Por lo tanto, los polímeros recuperados a las condiciones de disolución al 30 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG, concuerdan estructuralmente al poliestireno.

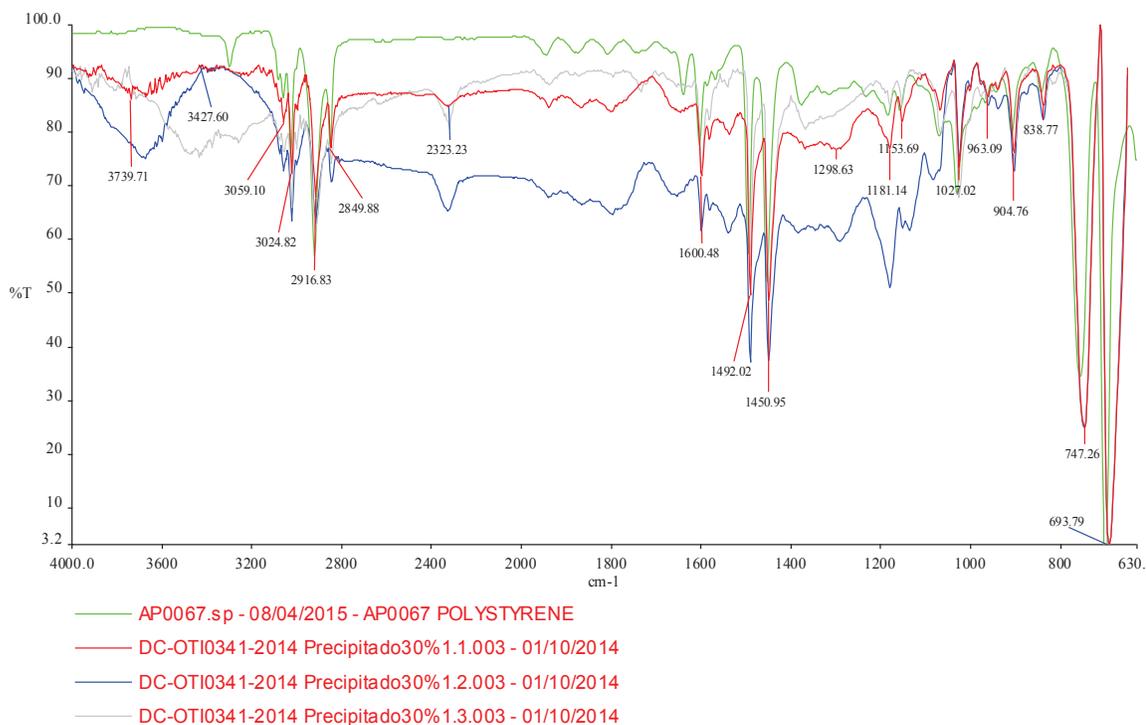


Figura 3.7. Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 30 % EPS y precipitación al 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG

Existe descompensación atmosférica notoria al momento de realizar los ensayos 30 % EPS - 1/2 THF/EG y 30 % EPS – 1/3 THF/EG. Lo que se evidencia en sus respectivos espectros con la frecuencia ancha alrededor de 3428 cm^{-1} y también de absorción de CO_2 en 2323 cm^{-1} .

3.2.1.4 Polímeros recuperados por los ensayos: disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 y 1/2 THF/EG

A continuación, se analizan los espectros de los polímeros recuperados por el método disolución – precipitación ensayos: 40 % EPS - 1/1 THF/EG y 40 % EPS – 1/2 THF/EG, detallados en la Figura 3.8 y con ayuda de la información de la Tabla 3.1. Para la disolución 40 % EPS no se probó la relación volumétrica 1/3 THF/EG, debido a problemas con la viscosidad de la solución que impedían la agitación durante la adición del precipitante.

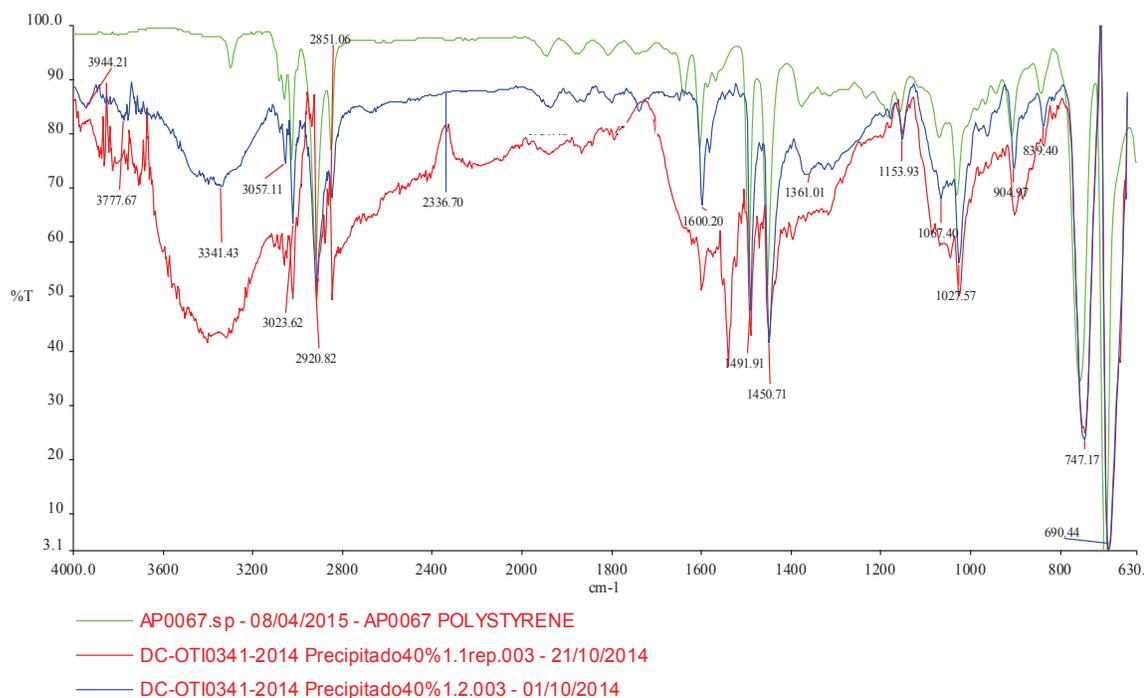


Figura 3.8. Espectros de los polímeros recuperados por los ensayos de disolución 40 % EPS y precipitación al 1/1 y 1/2 THF/EG

En los espectros de los polímeros recuperados a las condiciones mencionadas se diferencian las bandas correspondientes al estiramiento de los enlaces C-H y el anillo aromático, propio de la estructura del poliestireno, en las frecuencias de 3 057 y 3 024 cm^{-1} . Otros modos vibratorios por la absorción infrarroja del anillo aromático aparecen en 1 600, 1 492 y 1 451 cm^{-1} ; así como en 747 y 690 cm^{-1} , frecuencias que diferencian al poliestireno. La molécula de CH_2 también se hace presente en 2 921 y 2 851 cm^{-1} por sus estiramientos asimétrico y simétrico, respectivamente.

La absorción atmosférica por humedad se registra ampliamente en 3 341 cm^{-1} como una evolución negativa para ambos espectros. En el caso de la absorción por CO_2 con una banda cercana a 2 337 cm^{-1} ocurre en el espectro del polímero recuperado en el ensayo 40 % EPS – 1/1 THF/EG, lo que se justifica por la diferencia de condiciones entre la realización del análisis y el background.

En general, se puede inferir que los espectros analizados de los polímeros recuperados corresponden al poliestireno, debido a la presencia de las frecuencias de absorción características de los grupos funcionales de la macromolécula. La comparación de cada grupo de espectros con el estándar bibliográfico del poliestireno avala este resultado, como se visualiza en las figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8. Por lo tanto el método de reciclaje sugerido permite recuperar poliestireno a partir de EPS.

En consecuencia, si los espectros de los polímeros recuperados y el espectro del EPS recolectado corresponden al poliestireno, también presentarán similitud entre ellos.

La presencia de agente precipitante como remanente en la estructura del polímero no ha sido detectada en ninguno de los espectros, debido a que los porcentajes de contaminación podrían estar fuera de la sensibilidad y resolución del infrarrojo. Por lo que, mediante el análisis termogravimétrico se verificará la existencia de esta impureza.

3.2.2 CARACTERIZACIÓN POR TERMOGRAVIMETRÍA DEL POLÍMERO RECUPERADO

A continuación, se presentan los termogramas gravimétricos obtenidos de cada proceso de reciclaje, es de interés la composición de cada muestra en el rango de la degradación térmica y las temperaturas de descomposición de los polímeros. Por lo general, presentaron dos desviaciones con respecto a la línea base, la primera se identificó como la evaporación del etilenglicol remanente en la estructura del polímero, debido a su proximidad con la temperatura de ebullición (185 °C) del componente; la segunda desviación representa la descomposición del poliestireno reciclado.

En la Figura 3.9 se presenta la descomposición térmica del primer poliestireno obtenido de la disolución 10 % EPS. En el termograma se observa la pérdida de

peso de la muestra, la primera desviación inicia 7,26 min después de haber empezado el calentamiento y corresponde a la eliminación del etilenglicol remanente en el polímero, ocurre a una temperatura de 117,32 °C y termina al alcanzar 197,16 °C, en este rango de temperaturas existe una pérdida en peso de 1,55 %. Luego continúa la descomposición propia del poliestireno, curva prominente que comienza a 261,40 °C y finaliza en 476,41 °C, cuando la pérdida máxima de peso es del 97,19 % luego de 25,23 min de iniciado el calentamiento.

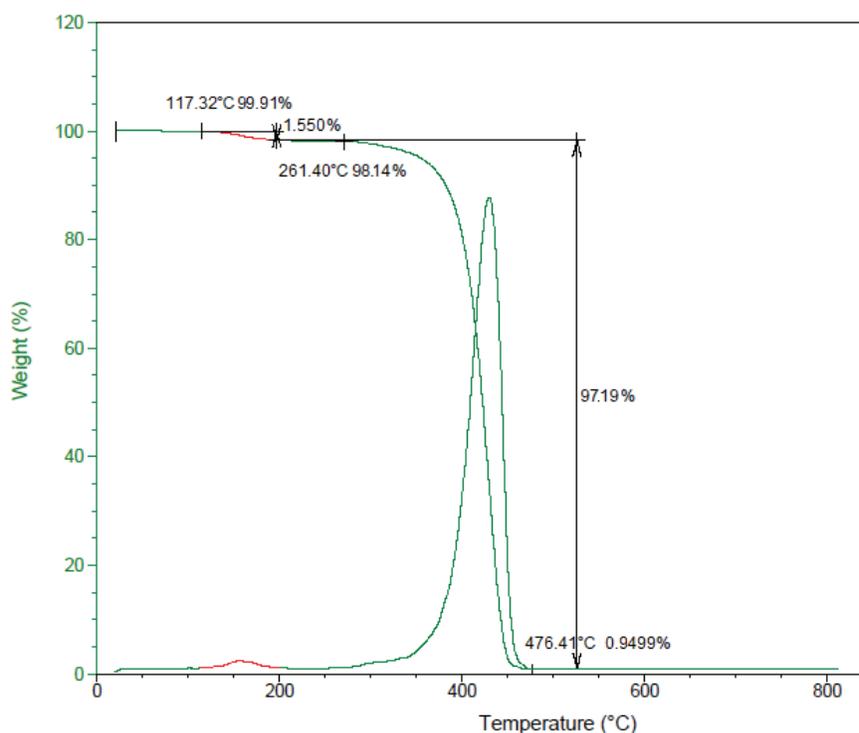


Figura 3.9. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

En la Figura 3.10 se presenta la descomposición térmica del poliestireno recuperado del ensayo 10 % EPS – 1/2 THF/EG. El termograma presenta la desviación correspondiente a la descomposición del etilenglicol remanente, inicia a 135,64°C y termina a 191,06 °C, que equivale a una pérdida en peso de 1,32 %. Luego la descomposición del poliestireno que comienza aproximadamente cuando el peso es de 98,37 % a 254,79 °C y finaliza a 480,18 °C.

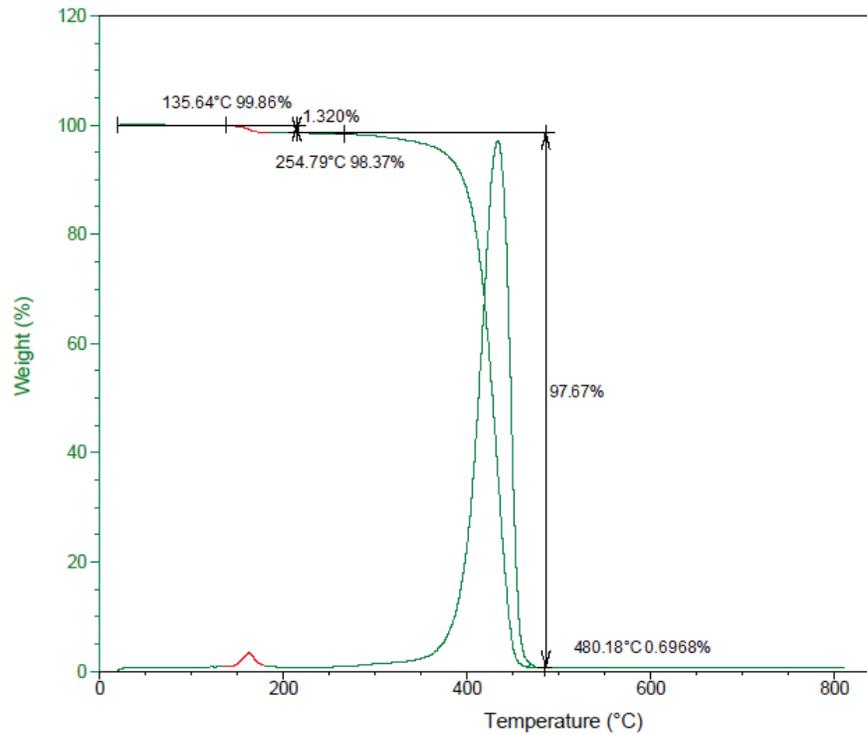


Figura 3.10. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

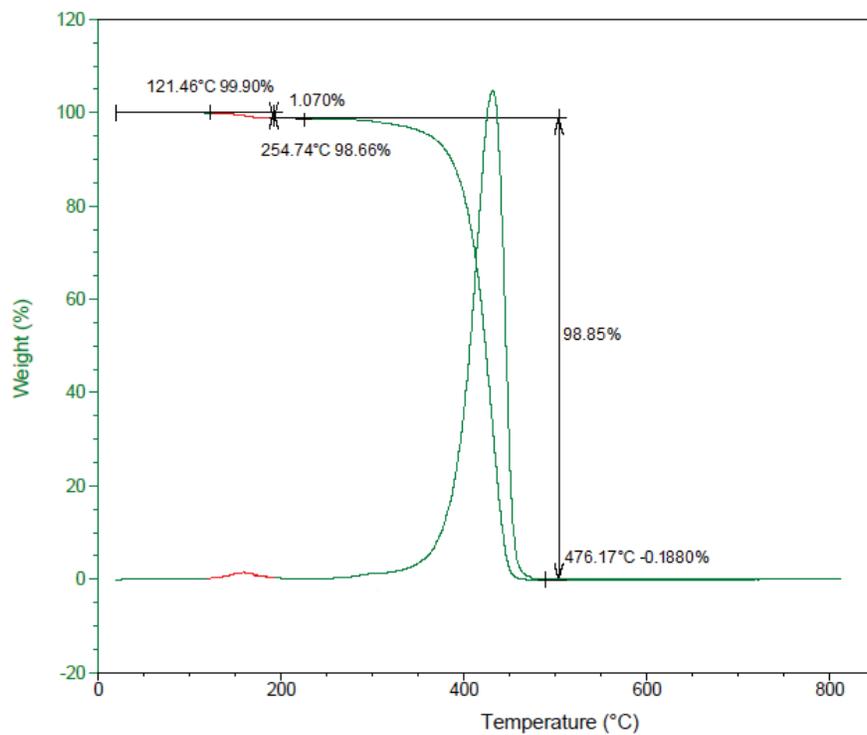


Figura 3.11. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG

El termograma de la Figura 3.11 presenta la degradación térmica del poliestireno recuperado del ensayo 10 % EPS – 1/3 THF/EG, se diferencian dos desviaciones, la primera que corresponde al etilenglicol remanente y la segunda a la descomposición del poliestireno. Se indica que el polímero contiene 1,07 % de precipitante en su estructura que se manifiesta a 121,46 °C. Luego de 10,97 min de calentamiento el glicol desaparece una vez que ha alcanzado los 191,34 °C, dando paso a la degradación del poliestireno que inicia a 254,74 °C hasta 476,17 °C, se descompone alrededor del 98,66 % de la muestra.

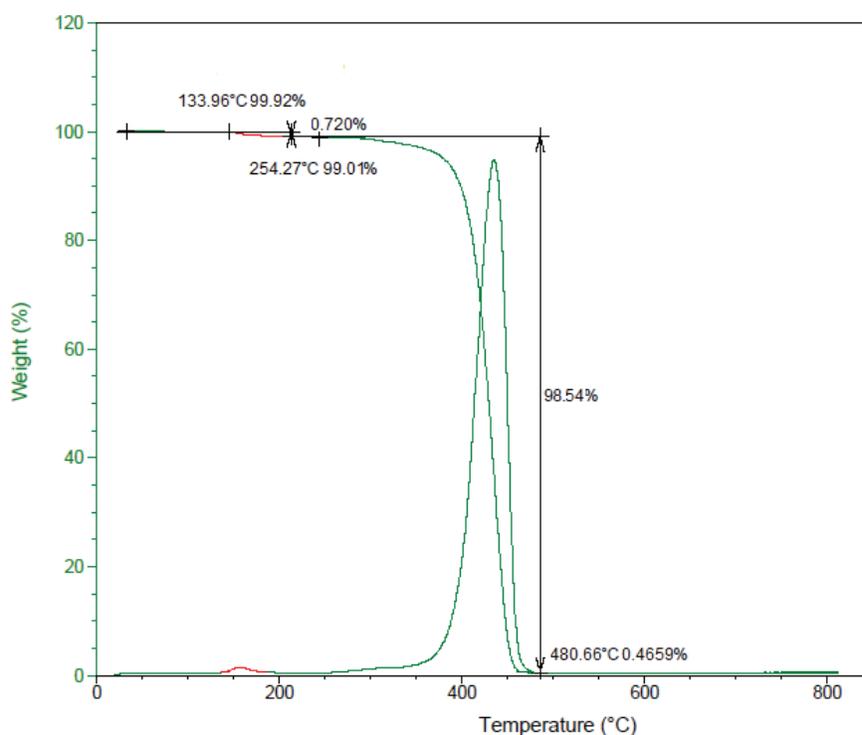


Figura 3.12. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

Con respecto al grupo de disolución del 20 % EPS, se presenta el termograma perteneciente al poliestireno precipitado con la relación 1/1 THF/EG en la Figura 3.12, donde se expone la degradación térmica del poliestireno que inicia en 254,27 °C hasta alcanzar los 480,66 °C, se ha perdido 98,54 % del peso del polímero después de 25,44 min de calentamiento. También se visualiza la evaporación del precipitante con *onset* en 133,96 °C y *endset* en 189,04 °C, con una pérdida de peso de 0,72 %.

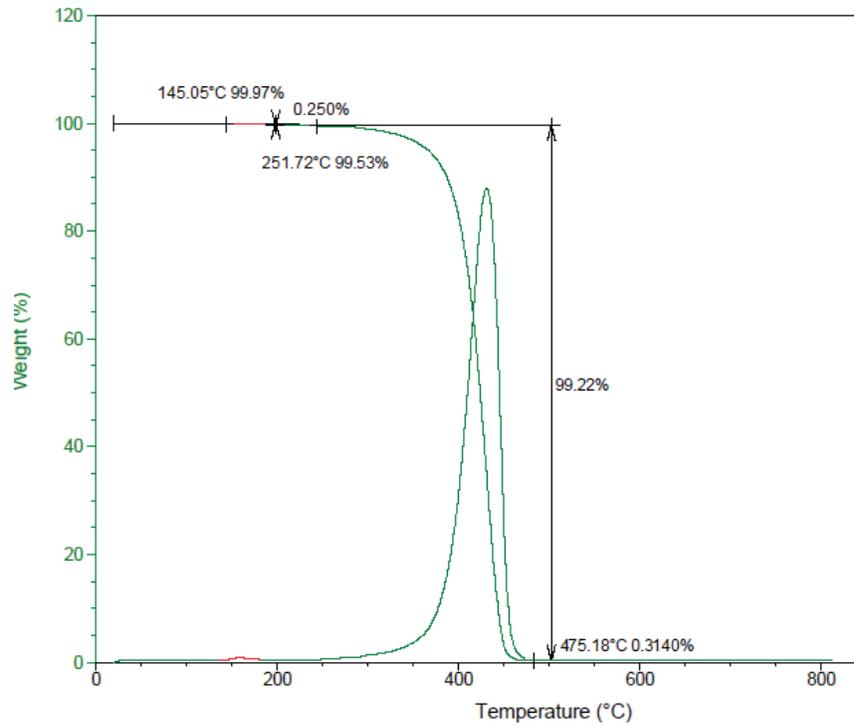


Figura 3.13. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

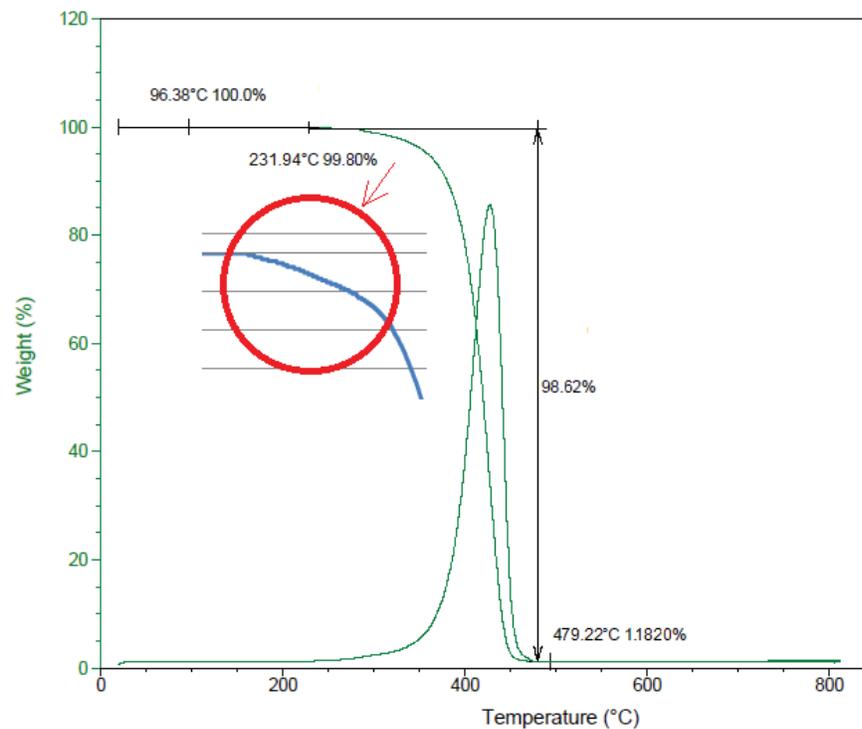


Figura 3.14. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG

En la Figura 3.13 se presenta el termograma del polímero recuperado a las condiciones de disolución 20 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG. Este poliestireno contiene apenas el 0,25 % de precipitante remanente, correspondiente a la desviación marcada con rojo que es minúscula, comienza en 145,05 °C y termina en 181,83 °C. Posteriormente, a 251,72 °C el poliestireno empieza a descomponerse hasta una temperatura de 475,18 °C, cuando la pérdida máxima de peso es de 99,22 %.

En el análisis termogravimétrico de la Figura 3.14 correspondiente al producto recuperado por la precipitación 1/3 THF/EG del grupo de disolución 20 % EPS, no se pudo reconocer una descomposición adicional a la del poliestireno, por lo que se estima que es el polímero menos contaminado de este conjunto. La degradación térmica del poliestireno se da en 231,94 °C hasta llegar al *endset* en 479,22 °C después de 25,37 min de iniciado el calentamiento, donde se han descompuesto alrededor del 98,62 % de la muestra.

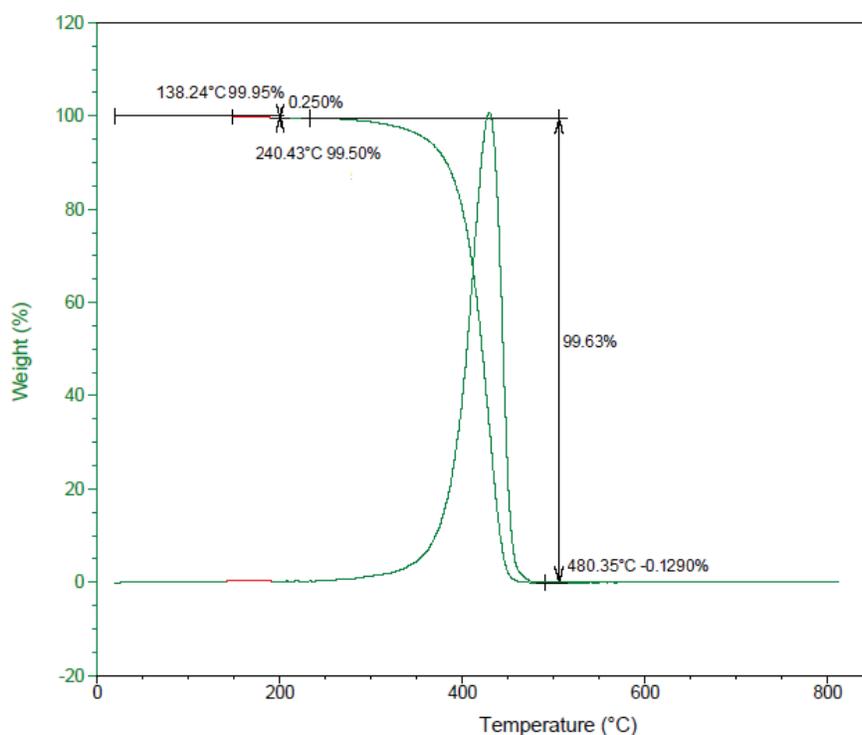


Figura 3.15. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

En la Figura 3.15 se representa el termograma del polímero reciclado por la disolución 30 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG, donde se registra la descomposición del poliestireno y en menor medida se observa la eliminación del etilenglicol remanente. Lo que se debe a la existencia del 0,25 % de precipitante que se descompone en el rango de 138,24 °C a 182,01 °C. El comienzo de la degradación térmica del poliestireno tiene como *onset* 240,43 °C y con una pérdida de alrededor de 99,5 % de la muestra, finaliza a una temperatura de 480,35 °C, luego de 25,42 min de iniciado el calentamiento.

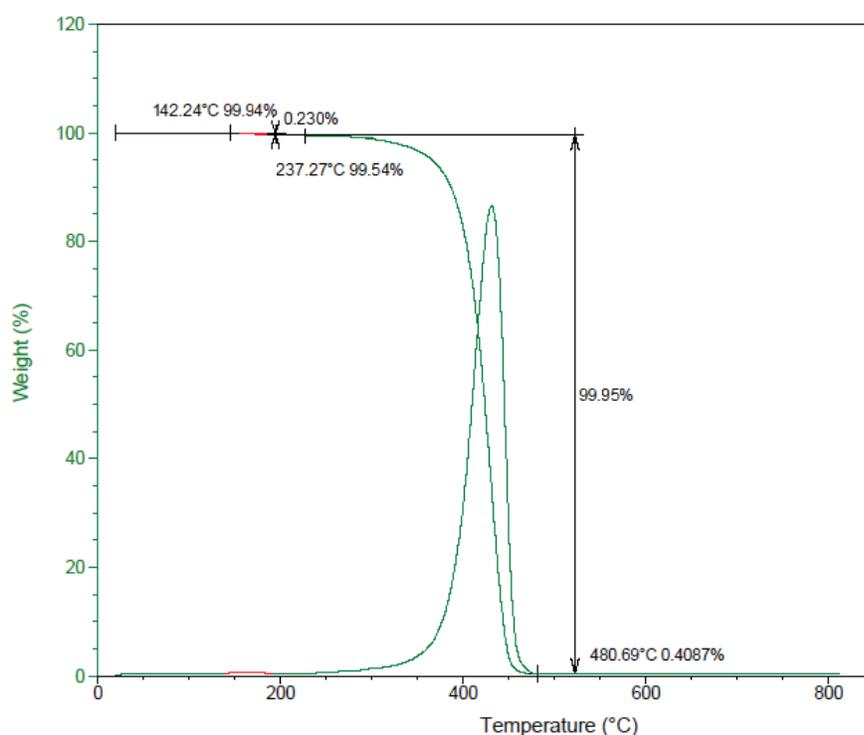


Figura 3.16. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

El poliestireno reciclado cuyo termograma se puede observar en la Figura 3.16, presenta dos descomposiciones durante la degradación térmica. La primera inicia en 142,24 °C y finaliza en 183,68 °C, corresponde al 0,23 % de pérdida en peso dentro de este rango. Una vez que se ha evaporado el etilenglicol, continúa la degradación del poliestireno con *onset* en 237,27 °C y *endset* en 480,69 °C, después de haber transcurrido 25,44 min de calentamiento se ha perdido alrededor del 99,95 % del polímero.

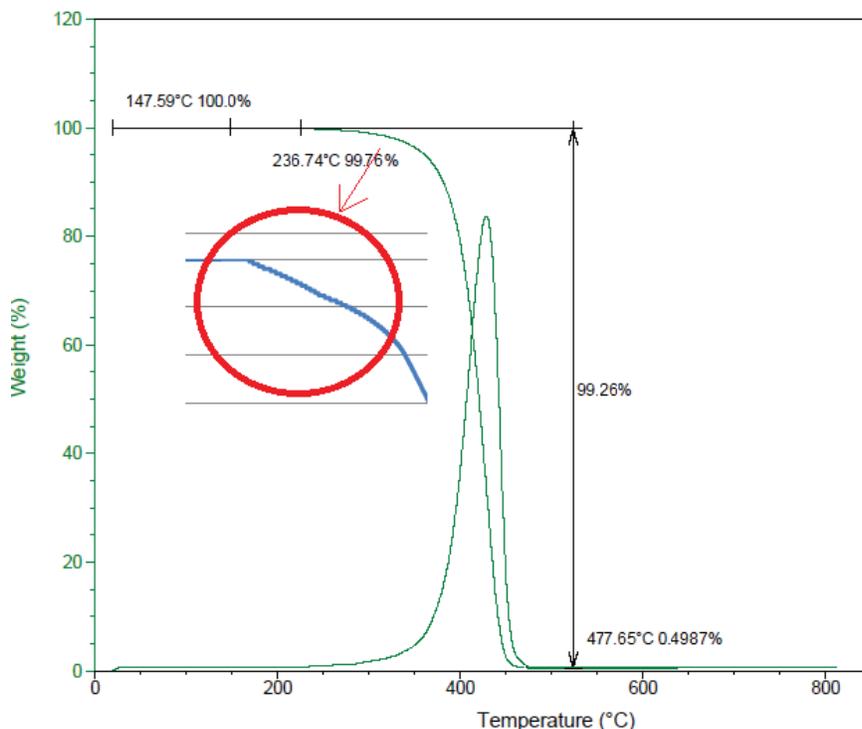


Figura 3.17. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG

El termograma del producto reciclado por el ensayo 30 % EPS – 1/3 THF/EG, representado en la Figura 3.17, muestra la descomposición sólo del poliestireno; es decir, que no se aprecia una descomposición adicional por efecto del etilenglicol remanente, de modo que es el polímero menos contaminado del grupo 30 %. La degradación térmica del poliestireno comienza en 236,74 °C y termina en 477,65 °C, luego de transcurrir 25, 29 min de calentamiento y descomponerse alrededor del 99,26 % de la muestra.

En la Figura 3.18 se representa la descomposición térmica del polímero obtenido por las condiciones 40 % EPS – 1/1 THF/EG, formada por dos curvas una correspondiente al etilenglicol remanente y otra propia del poliestireno. La primera descomposición inicia en 130,28 °C hasta 202,33 °C, rango en el que se ha perdido 0,71 % en peso. La degradación térmica del poliestireno corresponde a una pérdida de 97,78 % de peso en un rango de 237,94 °C hasta 483,1 °C, luego de 25,56 min de iniciado el calentamiento.

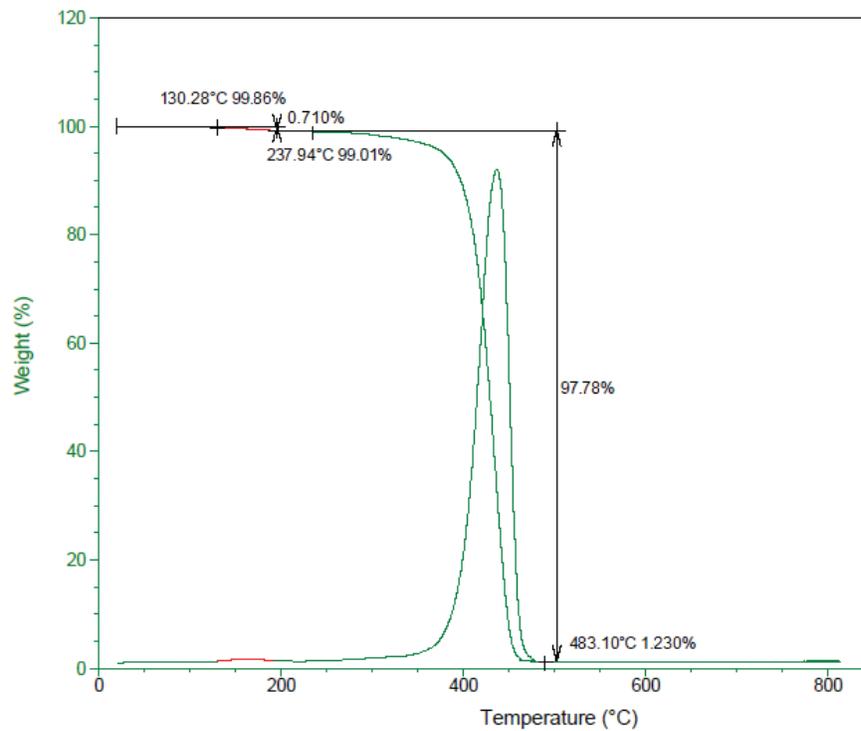


Figura 3.18. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

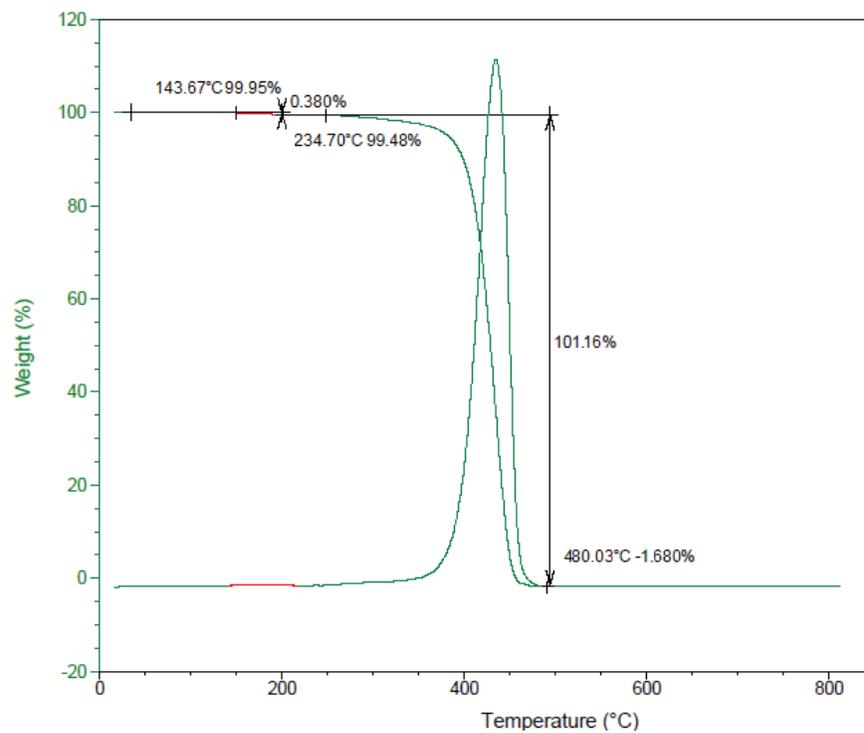


Figura 3.19. Termograma correspondiente al análisis por termogravimetría del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

La Figura 3.19 presenta el termograma del producto recuperado por la disolución 40 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG, donde la primera descomposición es reconocida como la eliminación de 0,38 % de etilenglicol en el polímero dentro de un rango de temperatura de 143,67 °C hasta 209,57 °C. El *onset* para la descomposición del poliestireno es de 234,7 °C y finaliza en 480,03 °C luego de degradar alrededor de 99,48 % del polímero después de 23,63 min de iniciado el calentamiento.

En la Tabla 3.3 se recopilan los datos suministrados de los termogramas, con el fin de distinguir la tendencia de degradación y de la composición de los poliestirenos reciclados.

Tabla 3.3. Variación de las temperaturas de degradación de los poliestirenos recuperados en cada ensayo

Ensayo		Contenido de etilenglicol (%)	Inicio de la descomposición térmica (°C)	Temperatura de máxima pérdida de peso (°C)
Proporción EPS	Relación THF/EG			
10 %	1/1	1,55	261,40	476,41
	1/2	1,32	254,79	480,18
	1/3	1,07	254,74	476,17
20 %	1/1	0,72	254,27	480,66
	1/2	0,25	251,72	475,18
	1/3	0,00	231,94	479,22
30 %	1/1	0,25	240,43	480,35
	1/2	0,23	237,27	480,69
	1/3	0,00	236,74	477,65
40 %	1/1	0,71	237,94	483,10
	1/2	0,38	234,70	480,03

De los datos tabulados se puede destacar que la contaminación por efecto del agente precipitante no supera el 1,6 %; por tanto, el proceso de reciclaje de EPS aplicado en general permite obtener poliestirenos con un nivel bajo de etilenglicol. En la Figura 3.20 se representa la proporción de agente precipitante en los polímeros reciclados por las disoluciones de 10, 20, 30 y 40 % de EPS; en función de la relación de etilenglicol utilizada para precipitar el poliestireno.

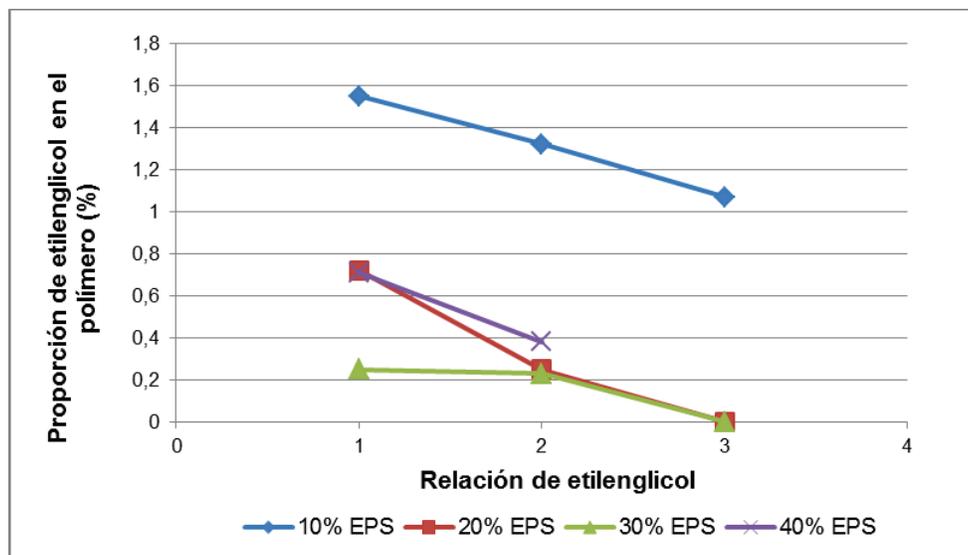


Figura 3.20. Contenido de etilenglicol en el polímero recuperado en función de la cantidad de agente precipitante usada en la precipitación (1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG)

La cantidad de etilenglicol presente en la estructura del polímero recuperado tiende a disminuir cuanto mayor es la cantidad de agente precipitante utilizado para precipitar el poliestireno en la disolución; es decir, que usar una porción mayor de etilenglicol favorece la recuperación del poliestireno disuelto. En el caso de la proporción del 40 % donde no se probó la relación volumétrica 1/3 debido a problemas con la viscosidad de la solución, las dos determinaciones para este grupo siguen la misma tendencia que las demás relaciones.

Por medio de la Figura 3.21 se demuestra experimentalmente, por qué la adición de una cantidad mayor de precipitante beneficia el proceso. Se representa la textura y apariencia de tres polímeros precipitados con la relación 1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG, respectivamente; sin importar la proporción de EPS utilizada en la disolución el fenómeno se repite en cada ensayo del método disolución - precipitación.

El efecto de la relación 1/1 THF/EG en el precipitado se puede ver en la Figura 3.21a, los polímeros recuperados con dicha relación se presentan como un fluido viscoso lo que dificulta su separación de la solución THF -EG y por tanto tienden a estar más contaminados; además, la solución filtrada luce blanquecina, lo que

se presume como poliestireno sin precipitar. Al contrario, los polímeros recuperados por las relaciones 1/2 y 1/3 THF/EG son fáciles de separar, lucen como una sola masa compacta y elástica como se puede apreciar mejor en la Figura 3.21c, por tanto la solución THF – EG no retiene polímero por precipitar adoptando una apariencia transparente.

Es por ello que los poliestirenos reciclados con 1/2 y 1/3 THF/EG, tienen menor contenido de remanente en su estructura. En las disoluciones 20 % EPS y 30 % EPS con una relación 1/3 THF/EG se estima que al no existir evidencia de la descomposición del etilenglicol en el análisis termogravimétrico, los convierte en poliestirenos sin contaminación por presencia del agente precipitante.

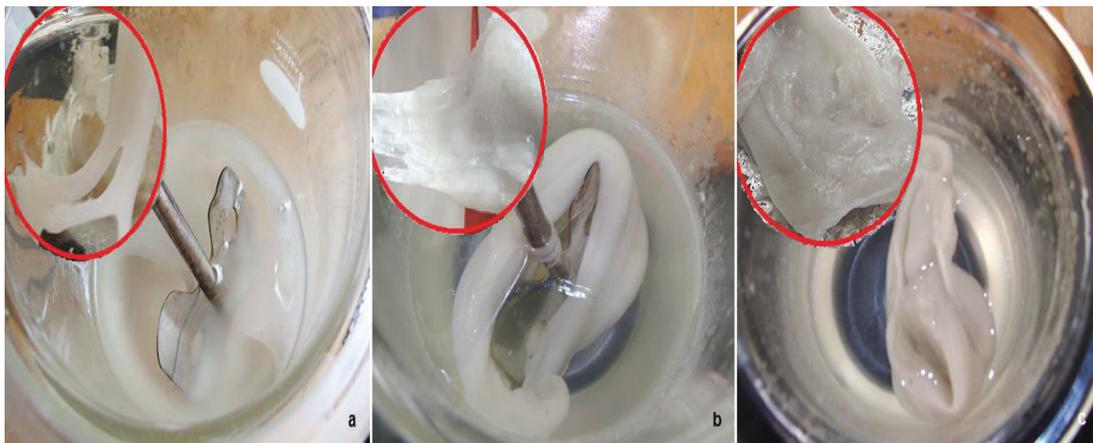


Figura 3.21. Poliestirenos precipitados con relación: **a.** 1/1 THF/EG, **b.** 1/2 THF/EG y **c.** 1/3 THF/EG

De lo que se puede inferir que la cantidad necesaria para precipitar el poliestireno en disolución es tres veces el volumen del solvente usado, de modo que se obtenga una masa compacta fácil de separar y aparte una solución THF – EG sin residuos de polímero, lo cual permitirá una recuperación más limpia de solvente y precipitante.

De lo que respecta a la eliminación del etilenglicol del polímero, ocurre en un rango promedio de 134,21 °C hasta 192,00 °C; en un tiempo aproximado de 4 min el precipitante desaparece. En los termogramas presentados se resalta con color

rojo la desviación correspondiente, mientras menor es la pérdida en peso es menos evidente su presencia; de modo que para los productos recuperados por los ensayos 20 % EPS – 1/2 THF/EG y 30 % EPS – 1/1 y 1/2 THF /EG es casi imperceptible la degradación de otro compuesto que no sea el poliestireno.

Acerca de la degradación térmica de los diferentes poliestirenos se da en un rango aproximado de 232 - 261 °C hasta 475 - 483 °C. Como se observa en la Tabla 3.3, la cantidad de etilenglicol remanente en la estructura de cada polímero se relaciona con el *onset* de la degradación del mismo, de modo que en cada grupo de disolución existe una tendencia descendente de la temperatura de inicio de la descomposición cuando menor es el contenido de contaminación del poliestireno. Con respecto al punto final de la degradación térmica de los polímeros recuperados es similar para cada ensayo.

En general, si se comparan las temperaturas de inicio y fin de la degradación térmica de los poliestirenos reciclados con el *onset* (276,44 °C) y *endset* (430,02 °C) del EPS recolectado, se deduce que existe un adelanto en el inicio y un retardo en el punto final de la degradación de los productos recuperados. Por tanto, la presencia de precipitante remanente afecta la descomposición térmica de los polímeros.

Con base en los resultados termogravimétricos, se establece que existen dos ensayos por los cuales se recuperó poliestireno sin contaminación por presencia de etilenglicol remanente, son la disolución del 20 y 30 % de EPS en THF y la precipitación con una relación volumétrica de 1/3 THF/EG, sumado a los procesos de lavado y secado detallados para todas las pruebas. Sin embargo, entre estos dos, se considera que las condiciones más adecuadas serán las que permitan reciclar mayor cantidad de desechos y convertirlos en poliestireno no contaminado, en este caso 30 % EPS – 1/3 THF/EG.

De modo que se enfatizan los análisis de caracterización del poliestireno reciclado por el ensayo 30 % EPS – 1/3 THF/EG. El análisis termogravimétrico correspondiente se analiza en la Figura 3.17, donde se muestra que la estabilidad

térmica del polímero recuperado es más baja comparada con el material de partida, pero tarda en degradarse más que el EPS recolectado. La caracterización estructural del producto reciclado por espectroscopia infrarroja se presenta en la Figura 3.22, en comparación con el estándar bibliográfico. Se verifica de esta forma que el polímero recuperado en esta técnica es poliestireno.

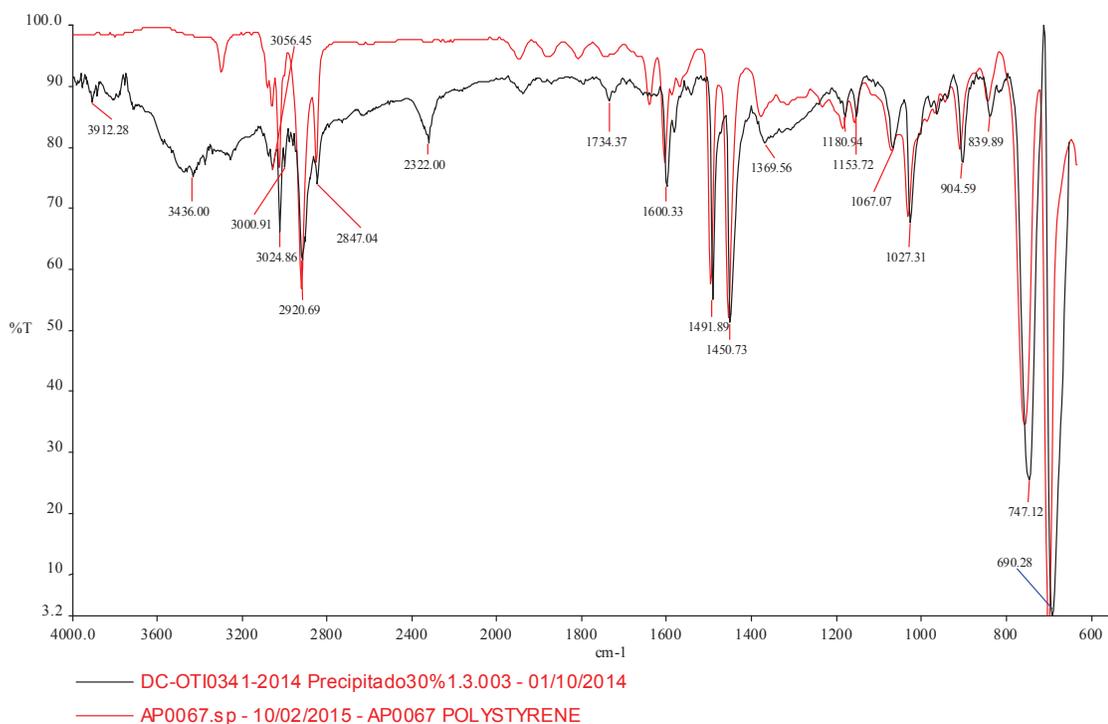


Figura 3.22. Espectro del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG comparado con el espectro bibliográfico

En el espectro se diferencian las zonas de absorción típicas del anillo bencénico cercanas a $1\ 600 - 1\ 450\ \text{cm}^{-1}$ que se amplifican en la región de $3\ 100 - 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$. La combinación de sobretonos se extiende entre $2\ 000$ a $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$, que se originan por la presencia del anillo monosustituido que se representa por dos picos en la región de 700 a $760\ \text{cm}^{-1}$.

En correlación con la Tabla 3.1, el estiramiento de los enlaces entre el C-H y el aromático se evidencia en la región de $3\ 057 - 3\ 001\ \text{cm}^{-1}$. La molécula de CH_2 que existe en la estructura del polímero sufre deformaciones en las frecuencias de

2 847 y 2 921 cm^{-1} . Los movimientos vibratorios del aromático también aparecen en 1 600 cm^{-1} , 1 492 y 1 451 cm^{-1} . Finalmente, en 747 y 690 cm^{-1} se manifiestan las deformaciones del poliestireno. Cabe recalcar que la característica región de la huella dactilar de los dos espectros tiene una notable similitud.

Adicionalmente, el efecto de la descompensación atmosférica por absorción de humedad se presenta en 3 436 cm^{-1} y por absorción fuerte de CO_2 se constata la frecuencia de 2 322 cm^{-1} . Persiste la banda de carbonilo en el polímero recuperado tal como se halló alrededor de 1 730 cm^{-1} en el EPS recolectado.

3.2.3 CARACTERIZACIÓN POR VISCOSIMETRÍA DEL POLÍMERO RECUPERADO

Por medio del valor del MFI se evalúa la calidad del polímero recuperado mediante la comparación del MFI de poliestirenos comerciales, de esta manera se determinó su uso para reprocesamiento por extrusión o inyección. Además, con esta propiedad se estimó un valor aproximado del peso molecular del polímero.

Tabla 3.4. Variación del índice de fluidez de los poliestirenos recuperados en cada ensayo

Ensayo		Índice de fluidez (g/10 min)
Proporción EPS	Relación THF/EG	
10 %	1/1	18,5901 ± 0,22
	1/2	16,9551 ± 0,13
	1/3	19,1386 ± 1,24
20 %	1/1	18,7404 ± 0,96
	1/2	18,1961 ± 1,19
	1/3	18,9342 ± 1,20
30 %	1/1	15,5615 ± 1,22
	1/2	18,6357 ± 2,63
	1/3	23,6044 ± 1,36
40 %	1/1	26,1183 ± 0,75
	1/2	19,2147 ± 1,62

En la Tabla 3.4 se tabulan los valores del MFI de cada polímero recuperado después de pasar por un plastómero. Los datos se muestran atípicos dentro de cada grupo de ensayos; por lo que en general se infiere que los polímeros obtenidos en las diferentes pruebas de reciclaje tienen un MFI entre 15,56 y 26,12 (g/10 min), según las condiciones del proceso.

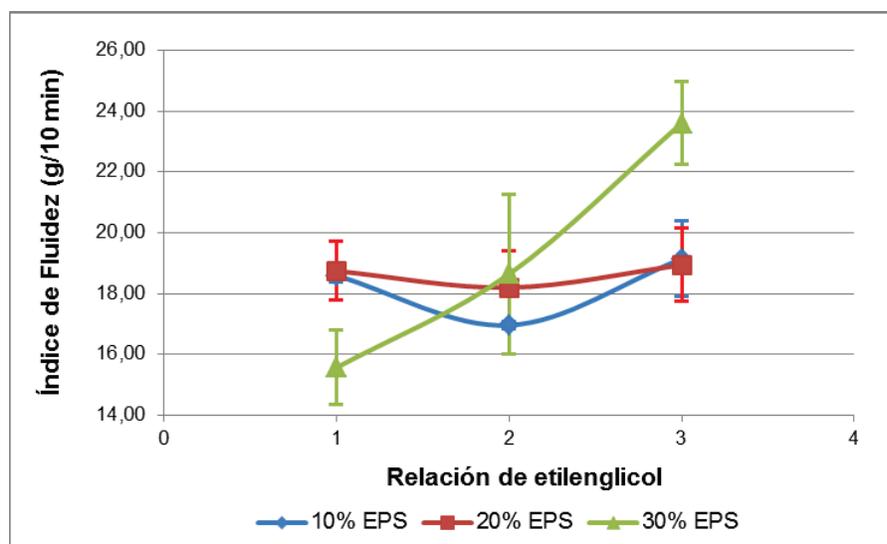


Figura 3.23. Índice de fluidez de los poliestirenos reciclados en función de la cantidad de agente precipitante usada en la precipitación (1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG)

La Figura 3.23 demuestra que los valores de MFI entre los poliestirenos reciclados no son iguales, pero se puede apreciar que están aproximadamente entre 16 y 21 g/10 min. Esta desviación es una consecuencia de que las cadenas que precipitan primero son las de mayor tamaño molecular y conforme se adiciona etilenglicol continúan precipitando el resto de cadenas con tamaños moleculares más pequeños. De modo que, no en todos los ensayos se habrá conseguido la misma distribución molecular de acuerdo a la cantidad de agente precipitante agregado. Los polímeros con una amplia distribución de tamaños tienden a fluir más (TA Instruments, 2013, p.2).

Además, se puede apreciar curvas convexas que indican que el MFI incrementa al usar una cantidad mayor de etilenglicol para precipitar al polímero, por lo que los poliestirenos recuperados con una relación 1/3 THF/EG tienen un MFI mayor que aquellos productos precipitados con un relación 1/1 THF/EG. No se considera

el grupo del 40 % de EPS para la Figura 3.23, porque es la condición menos eficiente debido a que la concentración del polímero en la disolución impide una mezcla apropiada con el agente precipitante.

La aproximación del MFI de los poliestirenos recuperados con el MFI de los poliestirenos comerciales, según la información provista en la Tabla AIV.1 que resume las características de calidad de dichos polímeros en el mercado, indica que el poliestireno obtenido del reciclaje de EPS por este método puede ser reprocesado por inyección o extrusión para la elaboración de distintos productos.

Con respecto al poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG, que es el producto de interés ya que no tiene remanente en su estructura, serviría para comercializarlo como poliestireno cristal, de acuerdo a la Tabla AIV.1. Dado a su MFI de 23,60 g/10 min podrá ser moldeado por extrusión o inyección para la producción de EPS o poliestireno extruido, paneles aislantes y artículos desechables.

3.2.3.1 Aproximación del peso molecular del polímero recuperado

Se hace una aproximación del peso molecular de los poliestirenos recuperados por medio de la comparación con un poliestireno comercial y de la relación directa de la viscosidad con el peso molecular.

De modo que, si los poliestirenos recuperados tienen índices de fluidez altos implica que tienen una viscosidad de flujo baja y en consecuencia un peso molecular bajo. Entre el poliestireno recuperado por las condiciones 30 % EPS - 1/1 THF/EG con un MFI de 15,56 (g/10 min) y el poliestireno recuperado por el ensayo 40 % EPS - 1/1 THF/EG con un MFI de 26,12 (g/10 min), el primero tendrá un peso molecular más alto debido a la diferencia entre estos valores.

En la Figura AIV.2 se pueden ver los datos de un poliestireno que está en el mercado, el mismo que servirá como parámetro de comparación. Si se considera

que dicho polímero tiene un MFI de 9,0 g/10 min y un peso molecular de 192 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, entonces, todos los poliestirenos obtenidos por el proceso de reciclaje tendrán un peso molecular menor a 192 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ debido a que el MFI que registran es mayor al del polímero comercial.

Los poliestirenos tendrán un peso molecular similar al del EPS a partir del cual se los recuperó, con base al criterio que establece que la disolución no produce degradación en el peso molecular y mucho menos si el proceso se desarrolla en ausencia de calentamiento. Por lo tanto, el peso molecular de los productos del reciclaje estará alrededor de 107 510 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, que es el peso molecular determinado para el EPS recolectado (Achilias et al., 2009, p. 450).

3.2.4 CARACTERIZACIÓN POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DEL POLÍMERO RECUPERADO

Por medio del análisis calorimétrico se obtienen la temperatura de transición vítrea de cada polímero recuperado. En la Tabla 3.5 se clasifican de acuerdo al proceso de recuperación y se relacionan con el contenido de etilenglicol remanente en la estructuras de los poliestirenos recuperados.

Por medio de los datos tabulados se infiere que, los productos recuperados por el reciclaje de EPS tienen una temperatura de transición vítrea entre 108,3 a 108,7 °C. Con excepción de los polímeros con mayor contenido de etilenglicol en su estructura que se obtuvieron por las condiciones disolución 10 % EPS y precipitación 1/1 y 1/2 THF/EG, debido a que el agente precipitante actúa como plastificante, estos 2 polímeros tienen una temperatura de transición vítrea menor e igual a 107,8 °C.

Los valores de la temperatura de transición vítrea de los poliestirenos se encuentran en el rango propuesto por las investigaciones de Rieger (1996), que es de 107 °C \pm 2 °C, de la misma forma que la temperatura de transición vítrea del EPS recolectado a partir del cual fueron recuperados (p.965).

Tabla 3.5. Temperatura de transición vítrea de los poliestirenos recuperados del reciclaje de EPS

Ensayo		Contenido de etilenglicol (%)	Temperatura de transición vítrea (°C)
Proporción EPS	Relación THF/EG		
10 %	1/1	1,55	107,8
	1/2	1,32	107,8
	1/3	1,07	108,4
20 %	1/1	0,72	108,3
	1/2	0,25	108,6
	1/3	0,00	108,6
30 %	1/1	0,25	108,4
	1/2	0,23	108,6
	1/3	0,00	108,7
40 %	1/1	0,71	108,3
	1/2	0,38	108,4

La Figura 3.24 permite comprender la tendencia que tiene la temperatura de transición vítrea de los poliestirenos recuperados al variar la relación de THF/EG utilizada en la precipitación. Las temperaturas de transición vítrea de los polímeros es similar para los grupos de disolución 20, 30 y 40 % EPS ensayados.

Anteriormente, se dedujo que mientras mayor era la proporción de etilenglicol usada para precipitar el poliestireno se beneficia la recuperación de todo el polímero disuelto en el tetrahidrofurano y se facilita su separación de la solución de THF/EG. Por lo tanto, se obtuvieron poliestirenos menos contaminados y con ello el contenido de etilenglicol en el producto disminuye lo que provoca un aumento en su temperatura de transición vítrea, debido a que el polímero no se encuentra plastificado por el precipitante.

Cabe recalcar que la cantidad de etilenglicol en la estructura de los poliestirenos reciclados no afecta significativamente al valor de la temperatura de transición vítrea. De modo que, según la Figura 1.2, si no existe cambios relevantes en la Tg es porque se ha alcanzado un cierto tamaño molecular, por lo que se puede decir

que $107\,510\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ es dicho punto y los polímeros recuperados tienen un peso molecular cercano a éste.

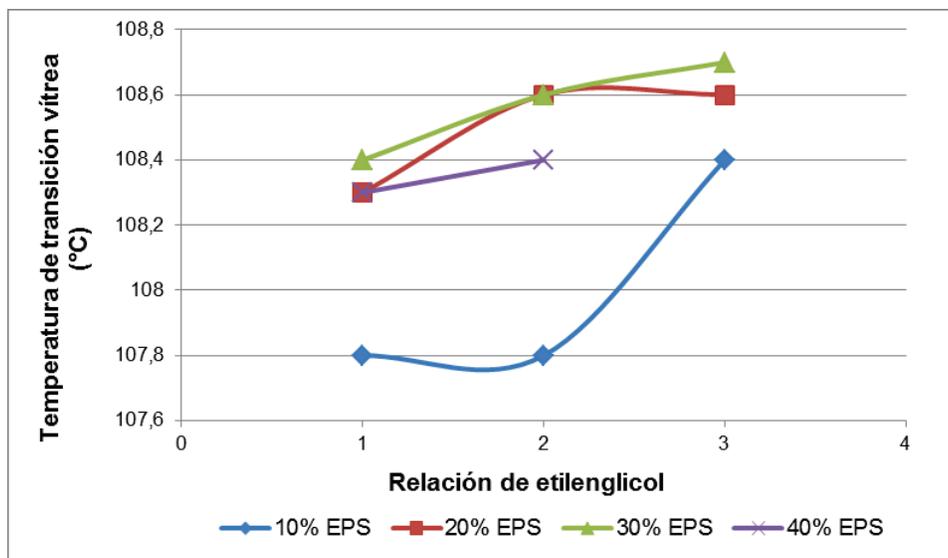


Figura 3.24. Variación de la temperatura de transición vítrea de los poliestirenos recuperados en función de la cantidad de agente precipitante utilizada en la precipitación (1/1, 1/2 y 1/3 THF/EG)

La pequeña diferencia entre las temperaturas de transición vítrea de los poliestirenos, de acuerdo con Hernández et al. (2000), se puede atribuir a que no todos los productos tienen el mismo peso molecular. Según lo analizado por viscosimetría, cada polímero obtenido por el reciclaje de EPS tiene un MFI distinto y debido a su relación con el peso molecular, este valor también diferirá entre los productos recuperados (p. 63).

A continuación, la Figura 3.25 representa el termograma del poliestireno reciclado por el método de disolución – precipitación a las condiciones más adecuadas, 30 % EPS – 1/3 THF/EG, que es el ensayo que permite reciclar mayor cantidad de desechos y obtener un poliestireno sin contaminación por etilenglicol.

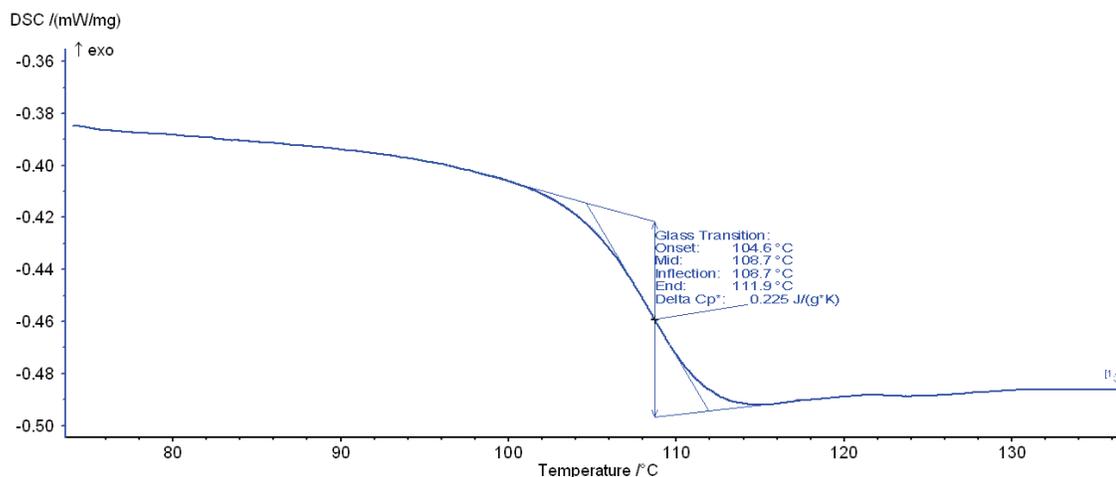


Figura 3.25. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG

El termograma indica que el poliestireno en cuestión tiene una temperatura de transición vítrea igual a 108,7 °C. Es el producto sin contenido de etilenglicol remanente y por lo tanto registra una temperatura mayor que los polímeros recuperados con un porcentaje de 1,55 y 1,32 % de contaminación, de modo que tendría un ligero aumento en su rigidez. Con relación al EPS recolectado que es el material de partida, también hay un ligero incremento de 0,7 °C respecto a la temperatura de transición vítrea que tiene el EPS.

3.2.5 CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE LOS REACTIVOS RECUPERADOS EN LA DESTILACIÓN

Se presentan los espectros infrarrojos correspondientes a los productos obtenidos de las dos destilaciones que se llevaron a cabo para recuperar los reactivos utilizados en el proceso de reciclaje del EPS.

3.2.5.1 Infrarrojo del destilado de la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación

La Figura 3.26 representa el espectro de uno de los productos que se obtuvieron por destilación fraccionada de la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación, denominado destilado. Se pretendía que el producto recuperado sea estructuralmente igual al tetrahidrofurano.

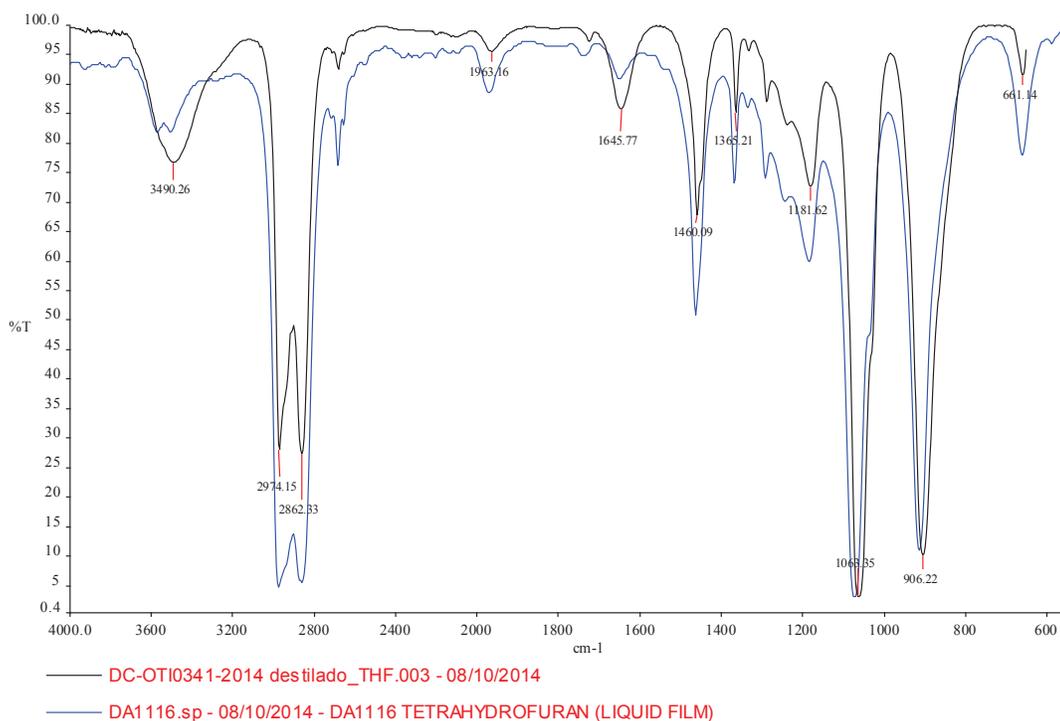


Figura 3.26. Espectro del destilado de la solución filtrada del proceso disolución – precipitación

En la misma figura se compara el espectro del producto de la destilación con el estándar bibliográfico del tetrahidrofurano, encontrándose coincidencias en la estructura y la región de la huella dactilar; por lo tanto el destilado que se obtuvo corresponde al solvente usado. Para identificar los grupos funcionales que constituyen este compuesto se toma como referencia la Tabla 3.6, donde la molécula presenta bandas características como furano y compuesto heterocíclico.

La banda correspondiente a $3\,490\text{ cm}^{-1}$ es una evidencia de grupos OH; aunque la molécula no presente en su estructura el hidroxilo aparece en el espectro tanto del destilado como en el bibliográfico debido a que el tetrahidrofurano es un compuesto altamente hidrocópico. Las frecuencias de $2\,974$ y $2\,862\text{ cm}^{-1}$ pertenecen al estiramiento asimétrico y simétrico de los enlaces C-H, la flexión que sufre el grupo $(\text{CH}_2)_4$ en el plano se observa en $1\,460\text{ cm}^{-1}$. El estiramiento del anillo aparece en $1\,646$ y $1\,365\text{ cm}^{-1}$.

Tabla 3.6. Bandas características de la absorción en el infrarrojo del tetrahidrofurano

	Frecuencia λ (cm^{-1})	Modo vibratorio
Furano	$\sim 3\,180 - 3\,000$	Estiramiento moderado del enlace del anillo-H
	$\sim 1\,610 - 1\,560$	Estiramiento del anillo de intensidad fuerte - moderada
	$\sim 1\,520 - 1\,470$	
	$\sim 1\,400 - 1\,390$	
	$\sim 595 - 515$	Flexión fuerte del anillo en el plano
THF como éter	$\sim 1\,090 - 1\,060$	Estiramiento asimétrico C-O-C de intensidad muy fuerte
Compuesto heterocíclico	$\sim 3\,000 - 2\,975$	Estiramiento asimétrico del C-H
	$\sim 2\,925 - 2\,875$	Estiramiento simétrico del C-H
	$\sim 2\,870 - 2\,840$	
	$\sim 1\,470 - 1\,440$	Flexión en el plano del CH_2
	$\sim 1\,250 - 900$	Estiramiento del C-O
	$\sim 900 - 600$	Flexión fuera del plano del C-H

(Hummel, 2002, pp.27, 30, 34; Stuart, 2004, pp.76, 83)

Con respecto al estiramiento del enlace C-O-C característico del tetrahidrofurano como compuesto heterocíclico, se contempla en $1\,182$ y $1\,063\text{ cm}^{-1}$ con intensidad más fuerte. Finalmente, en 906 y 661 cm^{-1} se encuentran las frecuencias originadas por la flexión que sufren los enlaces C-H.

Por lo tanto, de acuerdo al análisis por espectroscopia infrarroja el destilado de la solución THF – EG es tetrahidrofurano, puede contener algunas trazas de etilenglicol pues su presencia no es notoria en el espectro.

No existe descompensación atmosférica durante el análisis debido a la ausencia de las bandas de absorción por humedad (sobre $3\ 500\ \text{cm}^{-1}$) y CO_2 ($2\ 300\ \text{cm}^{-1}$), gracias al buen contacto entre la muestra y el cristal del infrarrojo.

3.2.5.2 Infrarrojo del residuo de la solución filtrada del proceso disolución – precipitación

En la Figura 3.27 se presenta el espectro de uno de los productos obtenidos por destilación de la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación, denominado residuo. El mismo que se espera sea estructuralmente igual al etilenglicol, por lo que se usa la información de la Tabla 3.7 como referencia bibliográfica.

Tabla 3.7. Bandas características de la absorción en el infrarrojo del etilenglicol

Frecuencia λ (cm^{-1})	Modo vibratorio
~3 330	Estiramiento del O-H
~2 937	Estiramiento del C-H
~2 878	
~1 450	Movimiento de tijeras del CH_2
~1 410	Flexión del O-H y aleteo del CH_2
~1 315	
~1 254	Torsión del CH_2
~1 200	
~1 094	Estiramiento del C-C y estiramiento del C-O
~1 046	
~887	Balanceo del CH_2
~866	

(Buckley y Giguère, 1967, p.399)

El espectro del residuo registra frecuencias características del etilenglicol en concordancia con los modos vibratorios de sus moléculas constitutivas. Así, las moléculas de CH₂ en 1 456 cm⁻¹ presentan un tijeeteo y en 1 257 y 1 205 cm⁻¹ torsión; aleteo a 1 315 cm⁻¹ y balanceo en las frecuencias de 881 y 860 cm⁻¹.

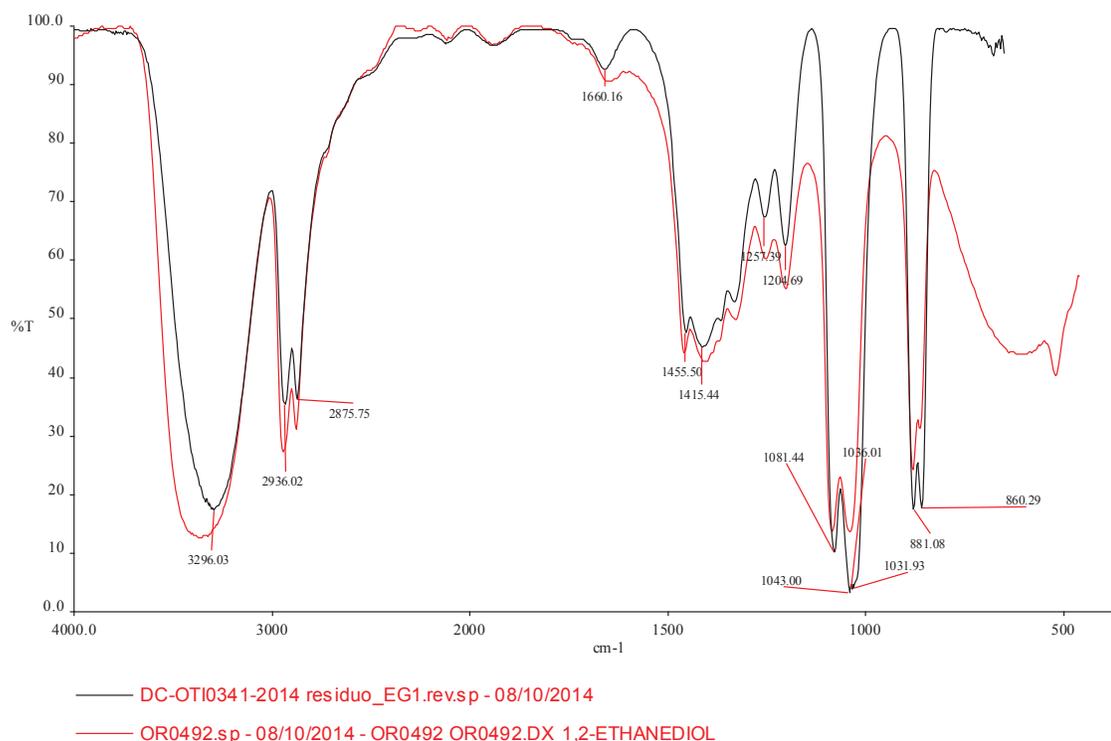


Figura 3.27. Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso disolución – precipitación

Se visualiza a 3 296 cm⁻¹ el estiramiento y la flexión con una banda ancha en 1 415 cm⁻¹ de los grupos hidroxilo de la molécula de etilenglicol. Los enlaces C-H del grupo CH₂ sufren un estiramiento a 2 936 y 2 876 cm⁻¹ y en 1 043 cm⁻¹ se da lugar un estiramiento de los enlaces C-O.

En relación al espectro bibliográfico, se puede inferir que el espectro registrado para el residuo de la destilación de la solución filtrada del proceso disolución – precipitación corresponde al etilenglicol, dada su semejanza estructural y similitud con la huella dactilar del estándar.

3.2.5.3 Infrarrojo del destilado de la solución filtrada del proceso de lavado

A continuación se presenta el espectro infrarrojo de uno de los productos que se obtuvieron por destilación fraccionada de la solución filtrada del proceso de lavado, denominado destilado, el cual se espera sea estructuralmente igual al alcohol isopropílico, utilizado como reactivo de lavado.

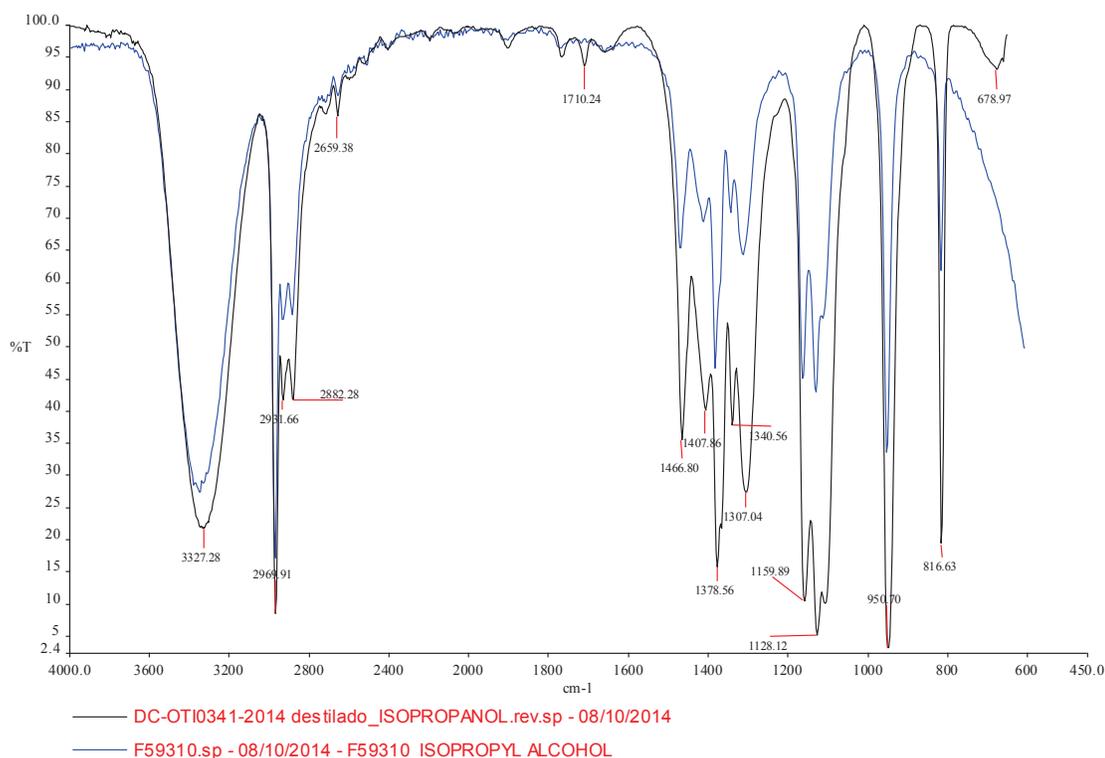


Figura 3.28. Espectro del destilado de la solución filtrada del proceso de lavado

Con relación al espectro del destilado representado en la Figura 3.28, no se manifiesta absorción sobre la longitud de $3\ 600\text{ cm}^{-1}$, lo que es característico de los grupos hidroxilos; bajo esta frecuencia se observa la zona de los grupos funcionales de la molécula.

Se aprecia en el espectro del destilado, el estiramiento del grupo hidroxilo en $3\ 327\text{ cm}^{-1}$. La absorción propia de los alcoholes secundarios se diferencia en $1\ 408\text{ cm}^{-1}$ por la flexión en el plano del O-H y en 679 cm^{-1} por la flexión fuera del plano del O-H. Se suman también los modos vibratorios del C-C-O en las

frecuencias de 1 341 y 1 307 cm^{-1} , estiramiento asimétrico en 1 160 y 1 128 cm^{-1} , y en la longitud de 817 cm^{-1} el estiramiento simétrico.

Tabla 3.8. Bandas características de la absorción en el infrarrojo del alcohol isopropílico

	Frecuencia λ (cm^{-1})	Modo vibratorio
Alcohol	~3 600	Estiramiento y contracción del O-H
	~1 300 – 1 000	Estiramiento del C-O
Isopropanol	3 350 \pm 150	Estiramiento del O-H
	~2 960	Estiramiento asimétrico del CH_3
	~2 931	Estiramiento asimétrico del CH_2
	~2 861	Estiramiento simétrico del CH_2
	~1 460 \pm 10	Estiramiento asimétrico del CH_3
	~1 410	Flexión en el plano del O-H
	~1 379	Vibración simétrica del CH_3 modo <i>umbrella</i>
	~1 160 – 1 100	Estiramiento asimétrico del C-C-O
	~952	Estiramiento CH_3 -C- CH_3
	~817	Estiramiento simétrico del C-C-O
	~655	Flexión fuera del plano del O-H

(Hummel, 2002, p.34; Programa IR Tutor; Smith, 1999, pp.70, 71)

Se observa además las tensiones asimétricas y simétricas de las moléculas de CH_2 que se encuentran en 2 932 y 2 882 cm^{-1} , respectivamente. Los grupos metilo sufren un estiramiento asimétrico con una intensidad muy fuerte en 2 970 cm^{-1} y también en 1 467 cm^{-1} , vibración simétrica *umbrella* a 1 379 cm^{-1} y un estiramiento en 951 cm^{-1} entre los enlaces CH_3 -C- CH_3 .

De acuerdo con la Tabla 3.8 el espectro del destilado muestra las bandas constitutivas del 2-propanol y en comparación con el espectro bibliográfico se confirma que el producto recuperado en la destilación de la solución filtrada del lavado es isopropanol. No se evidencia contaminación del producto.

3.2.5.4 Infrarrojo del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado

El espectro infrarrojo de uno de los productos que se obtuvieron por destilación de la solución del lavado, denominado residuo, se presenta como una combinación de frecuencias que simbolizan una mezcla de componentes; tal como se puede observar en la Figura 3.29. Con el color negro se diferencia al espectro del residuo, el color rojo representa al isopropanol y con el color verde se representa al etilenglicol, estos últimos son espectros de estándares bibliográficos de los constituyentes de la solución filtrada del proceso de lavado.

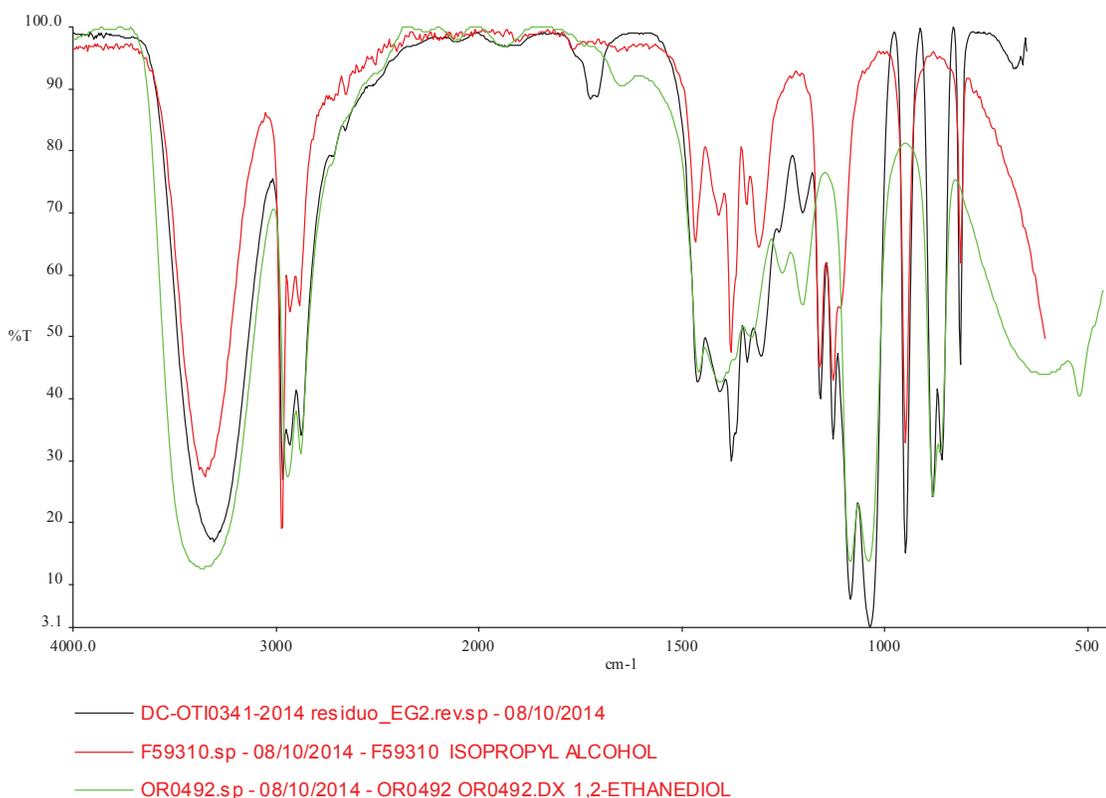


Figura 3.29. Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado comparado con sus componentes

En la Figura 3.30 se realiza la comparación entre el espectro del residuo obtenido y el estándar bibliográfico del alcohol isopropílico, y con base en la información de la Tabla 3.8 se plantea las similitudes entre las frecuencias de absorción de las moléculas del residuo y del isopropanol.

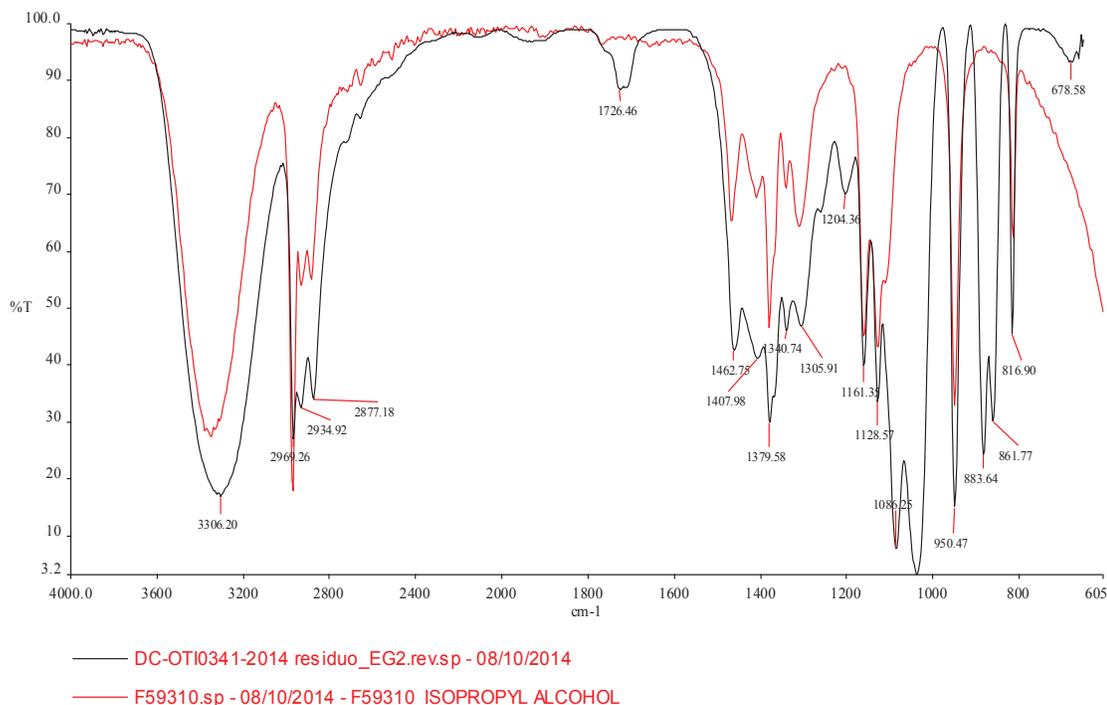


Figura 3.30. Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado comparado con el estándar bibliográfico del alcohol isopropílico

De modo que el espectro infrarrojo del residuo muestra las bandas concernientes a los alcoholes secundarios como la flexión del O-H en $1\ 408$ y $679\ \text{cm}^{-1}$ y los estiramientos del C-C-O en las frecuencias de $1\ 341$, $1\ 306$, $1\ 161$ y $1\ 129\ \text{cm}^{-1}$. La presencia de los grupos metilo aparece en $2\ 969$ y $1\ 463\ \text{cm}^{-1}$ como estiramiento asimétrico, en $1\ 379\ \text{cm}^{-1}$ como la vibración simétrica en forma de *umbrella* y en $951\ \text{cm}^{-1}$ como el estiramiento entre los enlaces $\text{CH}_3\text{-C-CH}_3$.

Adicionalmente, el estiramiento simétrico del C-C-O a $817\ \text{cm}^{-1}$ es una frecuencia que tiene la misma intensidad en el espectro bibliográfico y en la muestra. Existe también un alargamiento en $3\ 306,20\ \text{cm}^{-1}$ del grupo hidroxilo.

Es necesario también comparar las frecuencias de absorción del espectro del residuo obtenido por destilación y el estándar bibliográfico del etilenglicol, que es el otro componente de la solución filtrada. Para lo cual se dispone de la información en la Tabla 3.7 que se relaciona con la Figura 3.31.

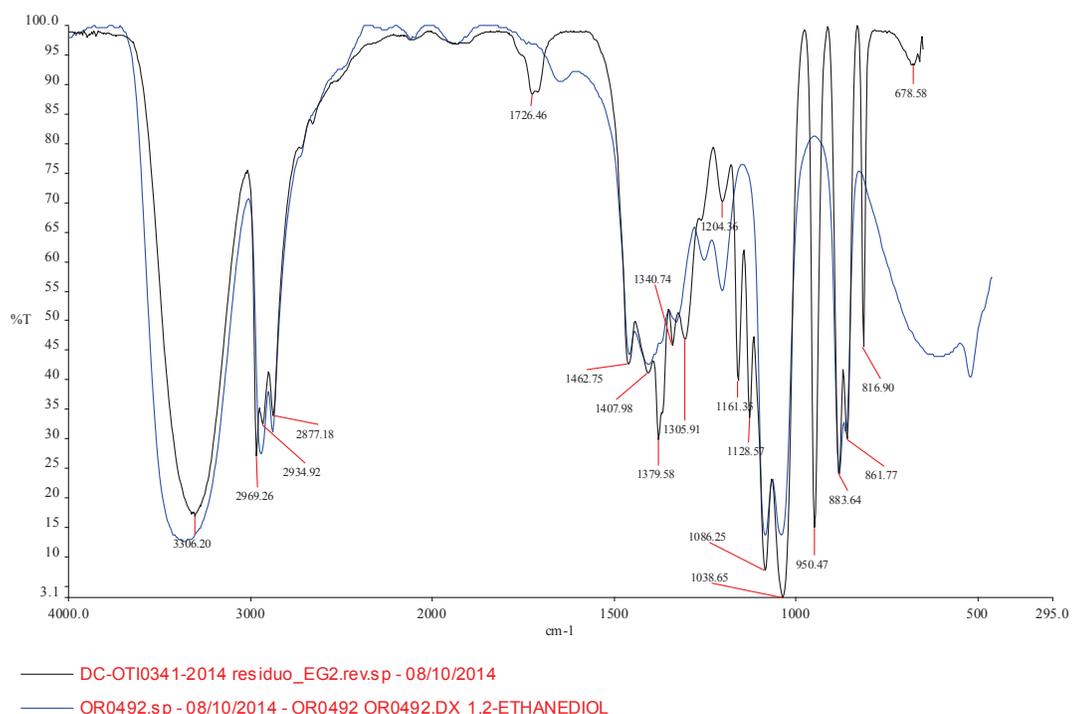


Figura 3.31. Espectro del residuo de la solución filtrada del proceso de lavado comparado con el estándar bibliográfico del etilenglicol

Existen bandas propias del etilenglicol en el espectro del residuo, así como la torsión de la molécula de CH_2 en $1\,204\text{ cm}^{-1}$, el estiramiento del C-C en $1\,086\text{ cm}^{-1}$, en $1\,039\text{ cm}^{-1}$ el estiramiento del C-O y el balanceo del CH_2 en las frecuencias de 884 y 862 cm^{-1} . Con respecto a los modos vibratorios de los hidroxilos en la molécula del glicol aparecen en $3\,306$ y $1\,408\text{ cm}^{-1}$, de igual forma como lo hacen en el espectro del isopropanol.

La frecuencia en $1\,463\text{ cm}^{-1}$ que aparece en el espectro del residuo puede atribuirse a la deformación asimétrica del grupo metilo presente en el isopropanol o también al tijereteo del CH_2 presente en el etilenglicol; el hecho de que sea una banda ancha superpone al CH_3 y al CH_2 . Este último grupo, se aprecia en la zona de $2\,935$ y $2\,877\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a las tensiones asimétricas y simétricas del CH_2 .

Por lo tanto, el residuo recuperado de la destilación no corresponde al etilenglicol puro, tal como se esperaba. El residuo de isopropanol encontrado demuestra que

no se han separado completamente los componentes de la solución filtrada en la destilación, de modo que el residuo recuperado equivale aún a la solución alcohol isopropílico – EG.

3.2.6 DETERMINACIÓN DE LA PUREZA DE LOS REACTIVOS RECUPERADOS

3.2.6.1 Pureza de los productos de la destilación de la solución THF - EG

Con la finalidad de determinar la pureza de los productos recuperados por la destilación de la solución filtrada del proceso de disolución – precipitación (THF – EG), se midió el índice de refracción del destilado y del residuo a temperatura ambiente (20 °C). Los valores se tabulan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Índice de refracción de los productos obtenidos por destilación de la solución THF – EG y compuestos puros

	Índice de refracción
Destilado	1,4085
Residuo	1,4255
Tetrahidrofurano	1,4070
Etilenglicol	1,4260

Estos valores dan una idea de la concentración que tiene tanto el destilado como el residuo; es decir, la medida del índice de refracción es útil para conocer la concentración de tetrahidrofurano y etilenglicol en el destilado y en el residuo. Para lo cual se utiliza la Figura 3.32 que muestra la relación lineal entre índice de refracción y la concentración.

Por lo que, de acuerdo a la ecuación de la recta el destilado con un índice de refracción de 1,4085 contiene 97,80 % de tetrahidrofurano y 2,20 % de etilenglicol que ha sido arrastrado en la fracción. De la misma manera, el residuo con un índice de refracción de 1,4255 es en un 95,60 % etilenglicol y retiene 4,40 % de

tetrahidrofurano. Los cálculos respectivos a la pureza de los productos de destilación se pueden encontrar en el Anexo VI.

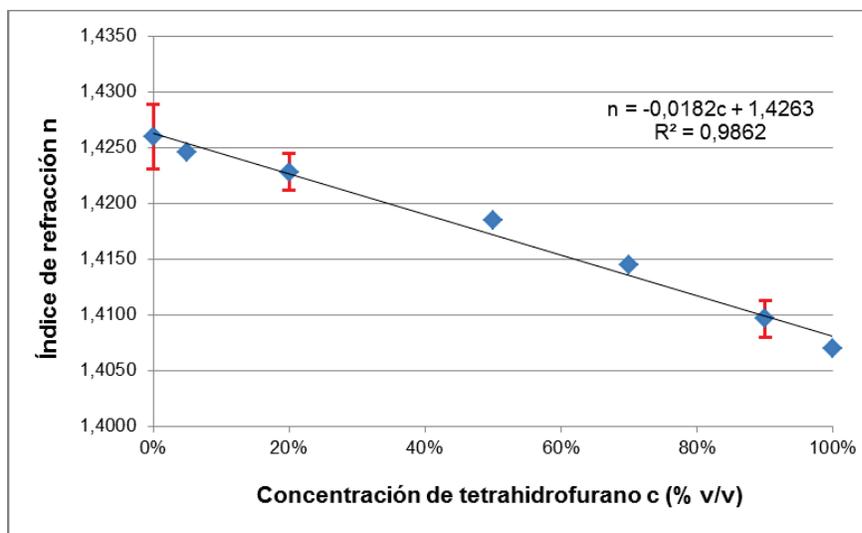


Figura 3.32. Relación entre el índice de refracción y la concentración de tetrahidrofurano en etilenglicol

Con relación a los índices de refracción de los compuestos puros, se denota una pequeña diferencia entre el destilado y el tetrahidrofurano puro, así como el residuo y el etilenglicol puro. De esta manera se corroboran los análisis por espectroscopia infrarroja.

Adicionalmente, se encontró que el rendimiento de la destilación con respecto a la cantidad de solvente recuperado es de alrededor del 75 % en función del tetrahidrofurano que ingresa a la destilación, por lo tanto existen pérdidas debido a la volatilidad del compuesto. Con respecto a la cantidad de agente precipitante recuperado en el residuo, el rendimiento es cercano al 99 % en base al etilenglicol que existe en la solución THF – EG que se destiló. El cálculo del rendimiento se adjunta en el Anexo VII.

3.2.6.2 Pureza de los productos de la destilación de la solución alcohol - EG

La Tabla 3.10 muestra los datos de los índices de refracción medidos para el destilado y el residuo a temperatura ambiente (20 °C).

Tabla 3.10. Índice de refracción de los productos obtenidos por destilación de la solución alcohol – EG y compuestos puros

	Índice de refracción
Destilado	1,3775
Residuo	1,4135
Isopropanol	1,3770
Etilenglicol	1,4260

Esta medida permite predecir el contenido de isopropanol y etilenglicol en el destilado y en el residuo, productos de la destilación de la solución filtrada del proceso de lavado, de modo que con la ecuación que se obtiene de la Figura 3.33, es posible relacionar al índice de refracción con la concentración de la solución.

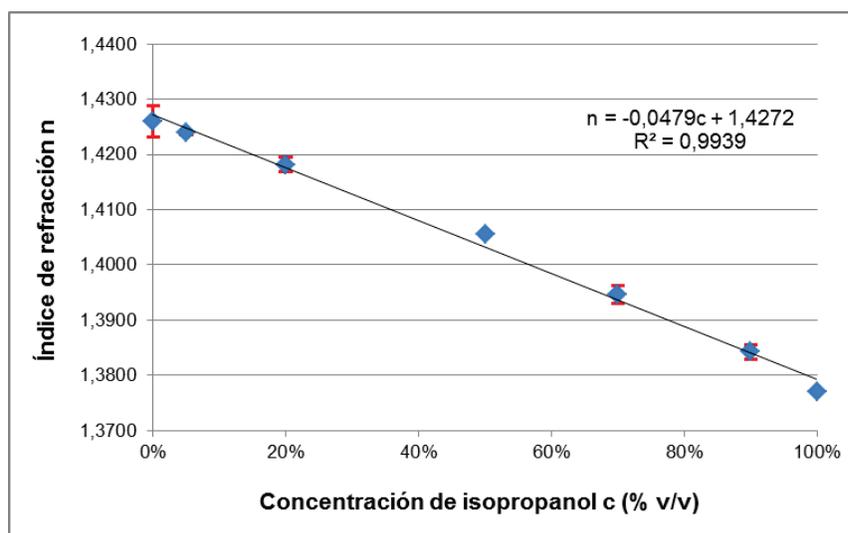


Figura 3.33. Relación entre el índice de refracción y la concentración de isopropanol en etilenglicol

Con base en la relación lineal se deduce que el destilado con un índice de refracción de 1,3775 es alcohol isopropílico puro y el residuo de la solución filtrada contiene aún un 28,60 % de isopropanol por destilar y 71,40 % es etilenglicol. Los cálculos correspondientes se detallan en el Anexo VI. De esta manera se corrobora la información estructural proporcionada por el análisis de espectroscopia infrarroja.

Cabe notar que de acuerdo a la ecuación de la recta, el destilado tendría una composición mayor al 100 % respecto al isopropanol, lo cual se justifica por una posible desviación de la tendencia lineal de la Figura 3.33, causada por el rango amplio de concentración usado para los estándares. Sin embargo, si el compuesto puro tiene un índice de refracción de 1,3770; se puede vincular con la pureza del destilado.

Sumada a la pureza, se plantea el rendimiento de la destilación con respecto a la cantidad del reactivo de lavado recuperado en el destilado, que es alrededor del 92 % en función del isopropanol que existe en la solución alcohol – EG que ingresa a la destilación. Con respecto al etilenglicol recuperado no se establece un rendimiento dada la contaminación que tiene el residuo de la destilación con alcohol. El cálculo respectivo al rendimiento se adjunta en el Anexo VII.

3.3 DISEÑO DEL PROCESO DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) A ESCALA PILOTO

3.3.1 CAPACIDAD DE LA PLANTA

Con base en la información proporcionada por la Cámara de Industrias de Guayaquil (2012), se estimó el 10 % de las importaciones de EPS como la capacidad de procesamiento para una planta a escala piloto. De modo que, el diseño del proceso de reciclaje por el método de disolución – precipitación será para 770 kg de residuos de EPS/día. El cálculo respectivo a la capacidad de la planta se adjunta en el Anexo VIII.

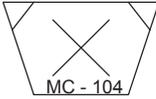
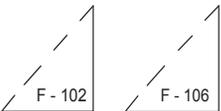
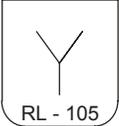
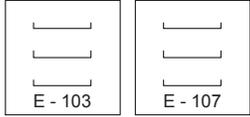
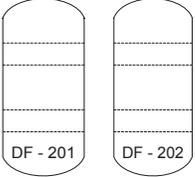
3.3.2 DIAGRAMAS DEL PROCESO

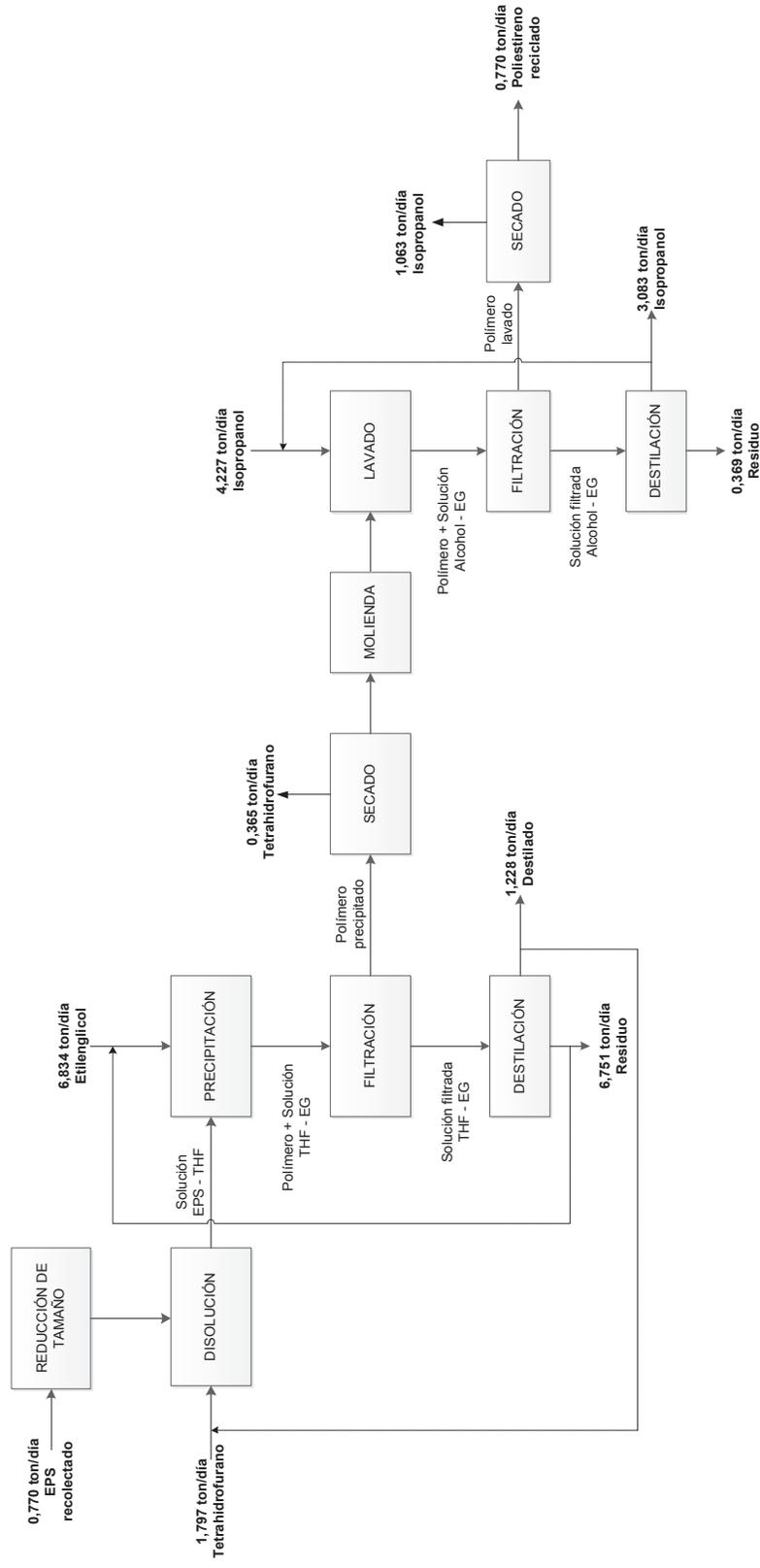
Se representa el diagrama de bloques (BFD) del proceso de reciclaje de EPS en la Figura 3.34, donde se describen las operaciones unitarias del mismo. Sobre la base del BFD del proceso, se expone el diagrama de flujo (PFD) en la Figura 3.35. El cuadro del resumen de las corrientes se observa en la Tabla 3.13 con relación al balance de masa respectivo.

3.3.3 PLANO DE SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA UTILIZADA EN EQUIPOS Y LÍNEAS DE CORRIENTE

Por medio de la Tabla 3.11 y Tabla 3.12, se da a conocer la simbología y nomenclatura utilizada en el PFD tanto para los equipos como para las líneas de corriente, con el fin de comprender la información proporcionada por el diagrama.

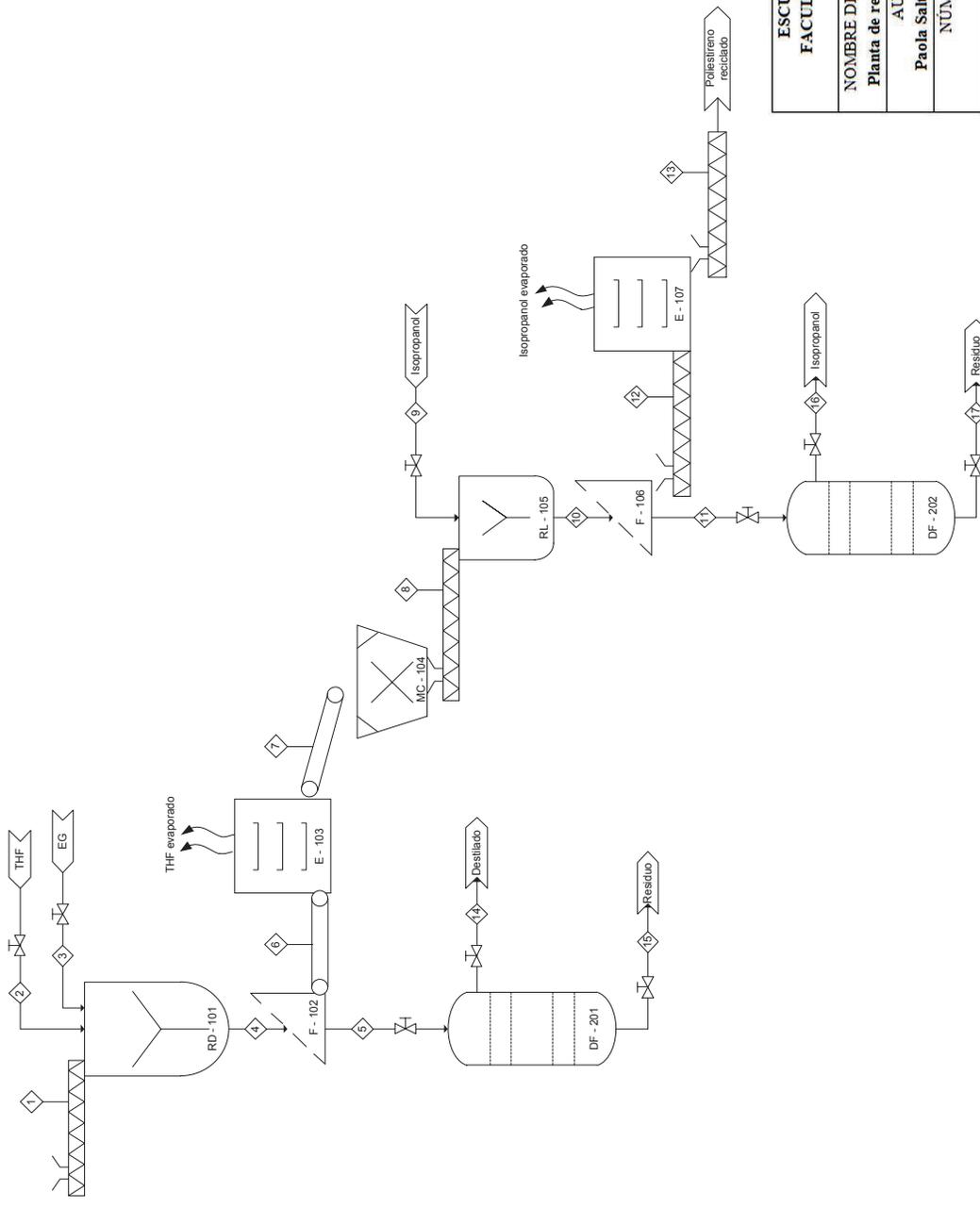
Tabla 3.11. Simbología y nomenclatura de los equipos que constituyen el PFD del proceso de reciclaje de EPS

Simbología y Nomenclatura (PFD)	Equipo	Simbología y Nomenclatura (PFD)	Equipo
	Recipiente para disolución y precipitación Equipo 1 en área 1		Molino de cuchillas Equipo 4 en área 1
	Filtro Equipo 2 en área 1 Equipo 6 en área 1		Recipiente para lavado Equipo 5 en área 1
	Estufa Equipo 3 en área 1 Equipo 7 en área 1		Columna de destilación Equipo 1 en área 2 Equipo 2 en área 2



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
NOMBRE DEL PROYECTO Planta de reciclaje de EPS	LÍNEA DE PRODUCCIÓN Producción de poliestireno
AUTOR Paola Salto Barreiro	FECHA 2015-03-01
NÚMERO DE PÁGINA DE DIAGRAMA 1 de 1 BDF	

Figura 3.34. Diagrama de bloques del proceso de reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución - precipitación



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
NOMBRE DEL PROYECTO Planta de reciclaje de EPS	LÍNEA DE PRODUCCIÓN Producción de poliestireno
AUTOR Paola Salto Barreiro	FECHA 2015-03-01
NÚMERO DE PÁGINA DE DIAGRAMA 1 de 1 PDF	

Figura 3.35. Diagrama de flujo del proceso de reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución - precipitación

Tabla 3.12. Nomenclatura de las líneas de corriente que constituyen el PFD del proceso de reciclaje de EPS

Nomenclatura	Línea de corriente	Nomenclatura	Línea de corriente
1	EPS recolectado, homogeneizado	10	Polímero lavado y solución alcohol – EG
2	Tetrahidrofurano (THF)	11	Solución alcohol - EG
3	Etilenglicol (EG)	12	Polímero lavado
4	Polímero precipitado y solución THF – EG	13	Poliestireno reciclado
5	Solución filtrada THF – EG	14	Destilado destilación 1
6	Polímero precipitado	15	Residuo destilación 1
7	Polímero seco	16	Isopropanol
8	Polímero molido	17	Residuo destilación 2
9	Isopropanol		

3.3.4 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO

Los desechos de EPS que han sido recolectados se fragmentan para reducir su tamaño a 4 mm y facilitar su disolución. El material molido se apila de acuerdo a las necesidades del procesamiento.

A continuación, el EPS fragmentado es transportado hacia el área de reciclaje para ser disuelto con tetrahidrofurano en una proporción del 30 % w/w de EPS. En el mismo recipiente RD – 101 y continua agitación se agrega el etilenglicol para precipitar al polímero una vez que éste se haya disuelto totalmente; se necesita un volumen de etilenglicol igual a 3 veces el volumen de solvente utilizado.

La disolución y la precipitación se realizan en el mismo recipiente debido a que la solución viscosa que forma el polímero y el tetrahidrofurano dificulta su traslado a otro recipiente. El proceso debe ser hermético para que no se evapore el solvente.

Finalizada la precipitación, se separa el polímero precipitado de la solución THF – EG por filtración en el equipo F – 102. La solución filtrada se destila en la columna DF – 201 para recuperar el solvente y el agente precipitante, esta operación ocurre en un sistema cerrado a 54 °C.

El polímero precipitado que ha sido separado tiene una consistencia blanda y está contaminado por la solución THF – EG, de modo que en la estufa E – 103 a una temperatura de 100 °C durante una hora se procede a evaporar el remanente de la solución. Las estufas deben funcionar por convección forzada de modo que no sea necesario un enfriamiento posterior.

El polímero seco tiene una apariencia rígida que permite su reducción de tamaño, se utiliza el molino de cuchillas MC – 104 para obtener gránulos de 2 mm, de esta manera se destruye la estructura porosa que tiene el precipitado después de su secado y se ayuda a que el lavado remueva los contaminantes. En el recipiente RL – 105 se adiciona isopropanol en una relación 2:1 respecto al peso del polímero molido, se lava durante una hora en agitación continua y se repite el proceso.

La solución de lavado alcohol – EG y el polímero granulado se filtran en F – 106, se separa la solución del polímero para continuar al proceso de destilación en la columna DF – 202 a una temperatura de 72 °C recuperándose isopropanol como destilado y etilenglicol como residuo. El polímero que ha sido lavado se transporta hacia la estufa E – 107 para evaporar cualquier contaminante sobrante y secar el producto, obteniéndose el poliestireno a manera de gránulos listo para el reprocesamiento.

Los productos de destilación recuperados, destilados y residuos; se recirculan al proceso de reciclaje una vez que se haya comprobado su pureza, como tetrahidrofurano, etilenglicol e isopropanol.

3.3.5 BALANCE DE MASA

El balance de masa del proceso de reciclaje de EPS se resume en la Tabla 3.13, se reúnen las corrientes que intervienen en el proceso de reciclaje con sus respectivos flujos másicos. Donde se estima que la planta piloto de reciclaje puede transformar 770 kg/día de desechos de EPS en poliestireno reciclado libre de contaminación por el agente precipitante (EG). Se desprecian las pérdidas de material. El Anexo IX comprende los cálculos correspondientes.

Adicionalmente, se puede recuperar alrededor del 83 % de tetrahidrofurano y 99% de etilenglicol, con base en el solvente y precipitante que ingresa a la destilación. En la segunda destilación se puede recuperar cerca del 97,44 % del reactivo de lavado. Los procesos de destilación pueden mejorar con la finalidad de obtener recuperados más puros.

Tabla 3.13. Flujos másicos de las corrientes principales del proceso de reciclaje de EPS

N° corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Flujo másico ton/día	0,770	1,797	6,834	9,401	7,980	1,421	1,057	1,057	4,227	5,284	3,451	1,833	0,770	1,228	6,751	3,083	0,368
EPS ton/día	0,770																
% pérdida peso							25,65						58,00				
Poliestireno ton/día				0,770		0,770	0,770	0,770		0,770		0,770	0,770				
Tetrahydrofurano ton/día		1,797		1,797	1,432	0,365								1,195	0,237		
Etilenglicol ton/día			6,834	6,834	6,548	0,287	0,287	0,287		0,287	0,287			0,033	6,514		0,287
Isopropanol ton/día									4,227	4,227	3,164	1,063				3,083	0,081

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. El proceso de reciclaje de poliestireno expandido (EPS) por el método de disolución – precipitación expuesto en esta investigación tuvo resultados positivos, se consiguió polímeros estructuralmente iguales al poliestireno. Es decir, que la técnica usada permitió obtener un producto para reprocesamiento a partir de desechos de EPS.
2. La caracterización de los desechos de EPS recolectados demostró que el material usado para el reciclaje tiene un peso molecular aproximadamente de $107\,510\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, una temperatura de transición vítrea de $108,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se descomponen térmicamente a $276,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar los $430,02\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. El desarrollo del proceso de reciclaje a diferentes condiciones se llevó a cabalidad, el método sugerido permite procesar hasta un 30 % de desechos de EPS, concentraciones mayores en la disolución no son recomendables. La relación volumétrica 1/3 THF/EG fue la más adecuada para conseguir un poliestireno reciclado sin contenido de etilenglicol remanente.
4. Los poliestirenos recuperados por el método de disolución – precipitación presentaron un porcentaje bajo de contaminación, el contenido de agente precipitante remanente no superó el 1,6 % y también se obtuvieron poliestirenos no contaminados, como es de interés.
5. Los poliestirenos reciclados tienen un peso molecular similar al de los desechos de EPS recolectados, un índice de fluidez que varía entre 15,56 y 26,12 g/10 min por lo que pueden ser reprocesados por inyección o extrusión para la elaboración de distintos productos.

6. El análisis por DSC determinó que la temperatura de transición vítrea de los poliestirenos reciclados fue entre 108,3 a 108,7 °C, a excepción de los polímeros con mayor contenido de contaminación donde el remanente actúa como plastificante. Todos se encuentran dentro del rango bibliográfico.
7. El proceso de reciclaje se complementó con la recuperación del solvente, agente precipitante y reactivo de lavado; por medio de destilación se consiguió tetrahidrofurano con pureza del 97,80 %; etilenglicol al 95,60 % e isopropanol puro. Se recuperó aproximadamente el 75 % de solvente, 92 % del reactivo de lavado y alrededor del 99 % de agente precipitante.
8. Una vez desarrollado el método de disolución – precipitación a diferentes condiciones, se diseñó una planta piloto de reciclaje con capacidad de 770 kg/día de residuos de EPS, donde se aplicó el método de disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG para producción de poliestireno reciclado sin contaminación de etilenglicol remanente.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Evaluar las propiedades mecánicas del material reciclado y compararlas con las propiedades de un poliestireno comercial.
2. Realizar un análisis por cromatografía de permeación en gel (GPC) para determinar específicamente la distribución de pesos moleculares de los desechos de EPS y de los poliestirenos reciclados.
3. Efectuar la recuperación de los reactivos del proceso en un sistema de destilación cerrado, para evitar pérdidas por volatilización. Una mejor separación de los componentes en la destilación se puede realizar con una columna de fraccionamiento con mayor número de platos teóricos.

4. Recuperar todas las fracciones del proceso de destilación, aún aquellas que se destilan al bajar la temperatura de la operación, con el fin de aumentar la posibilidad de separar y recuperar todos los componentes de las soluciones filtradas. Analizar su pureza y composición estructural.
5. Desarrollar un nuevo proyecto que evalúe la efectividad de los solventes verdes en el proceso de reciclaje de EPS por el método de disolución – precipitación, que incluya el proceso de recuperación de reactivos y la valoración del producto reciclado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Achilias D., Kanellopoulou I., Megalokonomos P, Lappas A. y Antonakou. (2006). *Chemical Recycling of Polystyrene*. Recuperado de <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=8084> (Enero, 2015)
2. Achilias D., Giannoulis A. y Papageorgiou G. (2009). Recycling of polymers from plastic packaging materials using the dissolution – reprecipitation technique. *Polymer Bulletin*, 63(3), 449-465. DOI: 10.1007/s00289-009-0104-5
3. Acierno S., Carotenuto C. y Pecce M. (2009). Compressive and Thermal Properties of Recycled EPS Foams. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 49(1), 13-19. DOI: 10.1080/03602550903282994
4. ASTM D2857–95 (2007). Standard Practice for Dilute Solution Viscosity of Polymers. *ASTM Book of Standards*, 08.01. DOI: 10.1520/D2857-95R07
5. ASTM D3418-12e1 (2012). Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. *ASTM Book of Standards*, 08.02. DOI: 10.1520/D3418-12E01
6. ASTM D5576-00 (2013). Standard Practice for Determination of Structural Features in Polyolefins and Polyolefin Copolymers by Infrared Spectrophotometry (FT-IR). *ASTM Book of Standards*, 08.03. DOI: 10.1520/D5576-00R13
7. ASTM D1238—13 (2013). Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. *ASTM Book of Standards*, 08.01. DOI: 10.1520/D1238
8. ASTM E1131-08 (2014). Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. *ASTM Book of Standards*. 14.02. DOI: 10.1520/E1131

9. Barnetson A. (2004). Expanded Polystyrene: Development, Processing, Applications and Key Issues. En Eaves D. (Ed.). *Handbook of Polymer Foams*, (pp. 37-54). Shrewsbury, Reino Unido: Smithers Rapra.
10. Brydson J. (1999). *Plastics Materials*. (7ma. ed.). Oxford, Inglaterra: Butterworth – Heinemann.
11. Buckley P. y Giguère P. (1967). Infrared studies on rotational isomerism. I. Ethylene glicol. *Can. J. Chem.*, 45(4), 397-407. DOI: 10.1139/v67-070
12. Cámara de Industrias de Guayaquil. (2012). Importaciones de materias primas plásticas. Recuperado de http://www.industrias.ec/archivos/file/INFORMACION%20PARA%20AFILIADOS/Import_m_primas_plast_corregida03_100212.pdf (Abril, 2014)
13. Castillo M. (2012). *Informe Ejecutivo - Consultoría para la realización de un Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos Domésticos y Asimilables a Domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito*. Recuperado de http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Caracterizacion_residuos.pdf (Enero, 2014)
14. Chatterjee G. y Prasad S. (2011). Polystyrene: Properties and it's applications in sensing platforms. En Gray J. (Ed.). *Materials Science and Technoogies: Polystyrene: Properties, Performance and Applications*, (pp. 119 - 141). Hauppauge, NY, USA: Nova.
15. Cistone D., Moore L. y Carreras E. (2003). Polystyrene reclamation process. *Patente EP1325066 (B1)*. Recuperado de http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=EP&NR=1325066B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20050119&DB=EPOD OC&locale=es_LP (Agosto, 2014)
16. Dirección Gestión de la Calidad Ambiental. (2013). *Listado de Gestores – Actualizado 05-03-2013*. Recuperado de <http://www.cip.org.ec/en/topicos->

de-interes/2012-11-07-17-16-48/ambiente-y-seguridad-industrial/255circulares-marzo-2013/741-gestores-autorizados-deresiduos,consultoresambientales-y-laboratorios-ambientales-registrados-dentro-del-distritometropolitano-de-quito.html. (Enero, 2014)

17. Fimmtech Inc. (2015). *Polymers and Plastics*. Recuperado de <http://www.fimmtech.com/index.php?id=6&subid=30> (Abril, 2015)
18. García M., Gracia I., Duque G., De Lucas A. y Rodríguez F. (2009a). Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11(1), 2–5. DOI: 10.1007/s10163-008-0210-8
19. García M., Gracia I., Duque G., De Lucas A. y Rodríguez F. (2009b). Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Journal Waste Management*, 29(6), 1814-1818. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.01.001
20. Hernández R., Selke S. y Culter J. (2000). *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications and Regulations*. Munich: Hanser.
21. Hummel D. (2002). *Atlas of Plastics Additives: Analysis by Spectrometric Methods* [Versión Adobe Digital editions]. ISBN 3-540-42414-8
22. Hussain Z., Khan K., Perveen S., Hussain K. y Voelter W. (2012). The conversión of waste polystyrene into useful hydrocarbons by microwave – metal interaction pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 94(1), 145-150. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.10.009
23. Jaypee's Medical. (2013). *Video Atlas of Assisted Reproductive Technologies and Clinical Embryology*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=OMkDBAAQBAJ&pg=PA23&dq=properties+of+polystyrene&hl=es&sa=X&ei=I4IXVK3SCITPggSihYDwDQ&v>

ed=0CCMQ6AEwAQ#v=onepage&q=properties%20of%20polystyrene&f=false

24. Kan A. y Demirboğa R. (2009). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 2994–3000. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017

25. Klempner D. y Frisch K. (1991). *Polymeric Foams*. Nueva York, Estados Unidos: Hanser

26. López D., Rhenals P., Tangarife M., Vega K., Rendón L., Vélez Y. y Ramírez M. (2013). *Tratamiento de residuos de Poliestireno expandido utilizando solventes verdes*. Recuperado de [http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)_Ingeniar_2013_Tratamiento_de_Residuos_Comerciales_e_Industriales_de_Poliestireno_Expandido_Utilizando_Solventes_Verdes_1278.pdf](http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_Ingeniar_2013_Tratamiento_de_Residuos_Comerciales_e_Industriales_de_Poliestireno_Expandido_Utilizando_Solventes_Verdes_1278.pdf) (Enero, 2014)

27. Maharana T., Negi Y. y Mohanty B. (2007). Recycling of Polystyrene. *Journal Polymer – Plastics Technology and Engineering*, 46(7), 729-736. DOI: 10.1080/03602550701273963

28. Mark J. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook*. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=fZl7q7UgEXkC&pg=PA395&dq=table+IR-bands+of+various+polymers&hl=es&sa=X&ei=BIK0VPipDobFgwSp h4HIDg&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q=table%20IR-bands%20of%20various%20polymers&f=false> (Enero, 2015)

29. Mott R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=LbMTKJ4eK4QC&pg=PA32&dq=viscosidad+de+un+polimero&hl=es&sa=X&ei=aVM8VLahA8WHsQTTuoKYB g&ved=0CBoQ6AEwAA#v=onepage&q=viscosidad%20de%20un%20polimero&f=false> (Octubre, 2014)

30. Nassar M., Abdelwahab N. y Elhalawany N. (2009). Contributions of polystyrene to the mechanical properties of blended mixture of old newspaper and wood pulp. *Journal Carbohydrate Polymers*, 76(3), 417-421. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.11.039
31. Network Polymers. (2015). *Data sheet Network Polymers PS CPS 80 1800*. Recuperado de <http://www.networkpolymers.com/CrystalPolystyrene> (Febrero, 2015)
32. Niessner N. y Wagner D. (2013). *Practical Guide to Structures, Properties and Applications of Styrenic Polymers*. eISBN: 9781847356918
33. Notari M. y Rivetti F. (2005). Use of dialkyl carbonates as solvents for expanded polystyrene. *Patente WO 2005023922 A1*. Recuperado de <http://www.google.st/patents/WO2005023922A1?cl=en> (Diciembre, 2013)
34. Perry R., Green D., y Maloney J. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Volumen I. (4ta. ed.). Madrid, España: McGraw – Hill/Interamericana de España.
35. Poletto M., Dettenborn J, Zeni M. y Zattera J. (2010). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Journal Waste Management*, 31(4), 779–784. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.027
36. Rieger J. (1996). The glass transition temperature of polystyrene. *Journal of Thermal Analysis*, 46(3-4), 965-972. DOI: 10.1007/BF01983614
37. Romo L. (1981). *Coloideofísica, coloideoquímica: Fenómenos de Superficie*. Quito, Ecuador: Universitaria.
38. Samper M., Rico M., Ferrandiz S. y López J. (2008). *Reducción y Caracterización del Residuo de Poliestireno Expandido*. En I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Alcoy, España. Recuperado de <http://www.redisa.uji.es/artSim2008/tratamiento/A27.pdf>. (Julio, 2013)

39. Schmidt P., Cioffi M., Voorwald H. y Silveira J. (2011). Flexural Test on Recycled Polystyrene. *Procedia Engineering*, 10, 930–935. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.153
40. Schmitt T. (2012). MNL17-2ND: Methods for Polymer Molecular Weight Measurement. *ASTM Book of Standards*. Capítulo 74. DOI: 10.1520/MNL12254M
41. Sekharan R., Abraham B. y Thachil E. (2012). Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica - filled natural rubber. *Journal Materials and Design*, 40, 221-228. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.03.042
42. Seymour R. y Carraher C. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=FOobaAs4Wp4C&pg=PA117&dq=viscosidad+en+estado+fundido+poliestireno&hl=es&sa=X&ei=IoAxVNptJdDGsQSE3IHBYBw&ved=0CB8Q6AEwAQ#v=onepage&q=viscosidad%20en%20estado%20fundido%20poliestireno&f=false> (Octubre, 2014)
43. Shin C. y Chase G. (2005). Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent. *Journal Polymer Bulletin*, 55(3), 209-215. DOI: 10.1007/s00289-005-0421-2
44. Sigma - Aldrich Co. LLC. (2014). *430110 ALDRICH Polystyrene*. Recuperado de <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/430110?lang=en®ion=EC> (Diciembre, 2014)
45. Smith B. (1999). *Infrared Spectral Interpretation: a Systematic Approach*. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=Ywz4GyoUaoC&pg=PA70&lpg=PA70&dq=ir+spectrum+of+isopropyl+alcohol&source=bl&ots=C4PJK40IHa&sig=KNf9c5nKjySUNWGXeyWLccA0npE&hl=es&sa=X&ei=896_VPn9M6rlsQSgnoHoDg&sqi=2&ved=0CEwQ6AEwCA#v=onepage&q=ir%20spectrum%20of%20isopropyl%20alcohol&f=false (Enero, 2015)

46. Stuart B. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications* [Versión Adobe Digital editions]. ISBNs: 0-470-85427-8
47. TA Instruments. (2013). *Understanding Rheology of Thermoplastic Polymers*. Recuperado de http://www.tainstruments.com/pdf/literature/AAN013_V_1_U_Thermoplast.pdf (Abril, 2015)
48. Total Petrochemicals. (2006). *Polystyrene. European grades and typical applications*. Recuperado de <http://www.monchy.com/thermoplasten/brochures/total-petrochemicals/total-polystyrene-grades> (Diciembre, 2014)
49. Total Refining & Chemicals. (2014). *Products: Crystal Polystyrene (PSC)*. Recuperado de <http://www.totalrefiningchemicals.com/EN/productcatalog/catalog/Pages/default.aspx?biz=PS&Orig=US> (Diciembre, 2014)
50. Yau W., Kirkland J. y Bly D. (1979). *Modern Size – Exclusion Liquid Chromatography: Practice of gel permeation and gel filtration chromatography*. Delaware, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULO DE LA SOLUBILIDAD

La elección del solvente para la disolución del EPS fue realizada en base a la relación de la solubilidad. De modo que se utilizó la expresión [1.8] que manifiesta que el poliestireno es soluble en solventes que cumplan la siguiente relación:

$$\sqrt{(\delta_v - 18)^2 + (\delta_h - 5)^2} < 5$$

Donde:

5: radio de la región de solubilidad

δ_v : parámetro de solubilidad

δ_h : puentes de hidrógeno

Para lo cual el parámetro de solubilidad es determinado por la expresión [1.7]:

$$\delta_v = (\delta_d^2 + \delta_p^2)^{1/2}$$

Donde:

δ_d : fuerzas de dispersión

δ_p : fuerzas dipolares

Tabla AI.1. Parámetros de solubilidad dimensionales de los solventes

Solvente	δ_d (cal ^{1/2} /cm ^{3/2})	δ_p (cal ^{1/2} /cm ^{3/2})	δ_h (J ^{1/2} /cm ^{3/2})
Benceno	8,95	0,50	2,05
Metanol	7,42	6,00	22,30
Tetrahidrofurano	8,22	2,80	7,98
Tolueno	8,82	0,70	2,05

(Yau et al., 1979, p.218)

El valor de la contribución de los puentes de hidrógeno, fuerzas dipolares y fuerzas de dispersión en la solubilidad del polímero son parámetros bibliográficos.

Se plantean en la Tabla A1.1 los valores de estas fuerzas para diferentes solventes, con el fin de comparar su relación de solubilidad.

$$\delta_{v_{BENCENO}} = ((8,95)^2 + (0,50)^2)^{1/2} = 8,96 \frac{cal^{1/2}}{cm^{3/2}} = 18,34 \frac{J^{1/2}}{cm^{3/2}}$$

$$\delta_{v_{METANOL}} = ((7,42)^2 + (6,00)^2)^{1/2} = 9,54 \frac{cal^{1/2}}{cm^{3/2}} = 19,52 \frac{J^{1/2}}{cm^{3/2}}$$

$$\delta_{v_{THF}} = ((8,22)^2 + (2,80)^2)^{1/2} = 8,68 \frac{cal^{1/2}}{cm^{3/2}} = 17,77 \frac{J^{1/2}}{cm^{3/2}}$$

$$\delta_{v_{TOLUENO}} = ((8,82)^2 + (0,70)^2)^{1/2} = 8,85 \frac{cal^{1/2}}{cm^{3/2}} = 18,10 \frac{J^{1/2}}{cm^{3/2}}$$

Con este parámetro se calcula la relación de solubilidad que tienen los solventes seleccionados respecto al poliestireno:

$$\text{Benceno} \rightarrow \sqrt{(18,34 - 18)^2 + (2,05 - 5)^2} = 2,97 < 5 \rightarrow \text{si cumple}$$

$$\text{Metanol} \rightarrow \sqrt{(19,52 - 18)^2 + (22,30 - 5)^2} = 17,37 < 5 \rightarrow \text{no cumple}$$

$$\text{THF} \rightarrow \sqrt{(17,77 - 18)^2 + (7,98 - 5)^2} = 2,98 < 5 \rightarrow \text{si cumple}$$

$$\text{Tolueno} \rightarrow \sqrt{(18,10 - 18)^2 + (2,05 - 5)^2} = 2,95 < 5 \rightarrow \text{si cumple}$$

Por lo tanto, el benceno, el tetrahidrofurano y el tolueno son solventes del poliestireno. Una vez analizada la relación de solubilidad y de acuerdo a las propiedades favorables que presenta el tetrahidrofurano, como son la baja temperatura de ebullición y alta velocidad de evaporación, sumado a que no es un reactivo controlado por el CONSEP; se lo selecciona como solvente para la disolución de los desechos de EPS.

ANEXO II

CÁLCULO DEL PESO MOLECULAR DEL EPS

Los datos tomados experimentalmente y tabulados en la Tabla AII.2 fueron utilizados para la determinación del peso molecular de los desechos de EPS recolectados. Se toma como referencia el tratamiento de los datos para la concentración de 0,02 g/100 mL, como ejemplo de cálculo.

Tabla AII.1. Datos experimentales para la determinación del peso molecular del EPS

Metil etilcetona		0,02 (g/100 mL)		0,04 (g/100 mL)		0,06 (g/100 mL)		0,08 (g/100 mL)	
Tiempo de flujo (s)	Picnómetro lleno (g)	Tiempo de flujo (s)	Picnómetro lleno (g)	Tiempo de flujo (s)	Picnómetro lleno (g)	Tiempo de flujo (s)	Picnómetro lleno (g)	Tiempo de flujo (s)	Picnómetro lleno (g)
7,00	94,1710	7,05	94,1734	7,15	94,1908	7,23	94,1964	7,33	94,2079
6,98	94,1691	7,05	94,1736	7,12	94,1884	7,24	94,1960	7,32	94,2087
6,93	94,1664	7,06	94,1733	7,15	94,1884	7,23	94,1964	7,33	94,2112

Se determinó el tiempo de flujo promedio y masa promedio para cada concentración ensayada.

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \quad [\text{AII.1}]$$

$$\bar{t}_{0,02} = \frac{7,05 + 7,05 + 7,06}{3} = 7,05 \text{ s}$$

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + p_3}{3} \quad [\text{AII.2}]$$

$$\bar{p}_{0,02} = \frac{94,1734 + 94,1736 + 94,1733}{3} = 94,1734 \text{ g}$$

La masa de la solución se determinó a partir del peso del picnómetro vacío y sin solución. Considerando que el peso del picnómetro vacío es de 48,7164 g.

$$m_{\text{solución}} = p_{\text{lleno}} - p_{\text{picnómetro vacío}} \quad [\text{AII.3}]$$

$$m_{\text{solución } 0,02} = 94,1734 - 48,7164 = 45,4570 \text{ g}$$

Tabla AII.2. Datos utilizados en la determinación del peso molecular del EPS

c (g/100 mL)	Tiempo de flujo (s)	Peso picnómetro lleno (g)	Masa solución (g)	Densidad experimental (g/mL)	Densidad real (g/mL)
Metil etilcetona	6,97	94,1688	45,4524	0,9090	0,7996
0,02	7,05	94,1734	45,4570	0,9091	0,7997
0,04	7,14	94,1892	45,4728	0,9095	0,8000
0,06	7,23	94,1963	45,4799	0,9096	0,8001
0,08	7,33	94,2093	45,4929	0,9099	0,8003

\bar{x} (n = 3) para el tiempo de flujo y el peso del picnómetro

La densidad experimental de la solución se calculó a 25 °C, por medio de la relación entre la masa de la solución y el volumen del picnómetro.

$$\rho_{\text{experimental}} = \frac{m_{\text{solución}}}{V_{\text{picnómetro}}} \quad [\text{AII.4}]$$

$$\rho_{\text{experimental } 0,02} = \frac{45,4570}{50} = 0,9091 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

La densidad real de la solución se determinó tomando en cuenta el factor de corrección del picnómetro, para lo cual se relacionó a la densidad del compuesto puro con la densidad experimental del metil etil cetona. El valor de la densidad real fue tomado del Manual de Perry (2001), p. 2-103.

$$f_{\text{corrección}} = \frac{\rho_{\text{real}}}{\rho_{\text{experimental}}} \quad [\text{AII.5}]$$

$$f_{\text{corrección}} = \frac{0,7996}{0,9090} = 0,8796$$

$$\rho_{\text{real}} = \rho_{\text{experimental}} \times f_{\text{corrección}} \quad [\text{AII.6}]$$

$$\rho_{\text{real } 0,02} = 0,9091 \times 0,8796 = 0,7997 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Con la densidad real de las soluciones, puede calcularse la viscosidad reducida a partir de las ecuaciones [1.1], [1.2] y [1.3]; la ecuación [1.1] se expresa también por la ecuación [AII.7].

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\rho_1 \times t_1}{\rho_2 \times t_2} \quad [\text{AII.7}]$$

$$\eta_{relativa\ 0,02} = \frac{\rho_{0,02} \times t_{0,02}}{\rho_{solvente\ puro} \times t_{solvente\ puro}} = \frac{0,7997 \times 7,05}{0,7996 \times 6,97} = 1,0121$$

Si se desea calcular la viscosidad de la solución η , se usa la relación de entre las densidades y los tiempos de flujo del sistema y del solvente puro multiplicado por la viscosidad del solvente a 25 °C. La viscosidad de metil etil cetona a la temperatura dada es de 0,0041 g/cm·s, de acuerdo al Manual de Perry (2001), pp. 2-329, 2-330.

Tabla AII.3. Viscosidades de la solución de EPS en metil etil cetona a diferentes concentraciones

c (g/100 mL)	Viscosidad solución	Viscosidad relativa	Viscosidad específica	Viscosidad reducida
0,02	0,00415	1,0121	0,0121	0,6029
0,04	0,00420	1,0248	0,0248	0,6212
0,06	0,00426	1,0384	0,0384	0,6401
0,08	0,00431	1,0521	0,0521	0,6513

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1$$

$$\eta_{sp\ 0,02} = 1,0121 - 1 = 0,0121$$

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c}$$

$$\eta_{reducida\ 0,02} = \frac{0,0121}{0,02} = 0,6029 \frac{mL}{g}$$

Una vez que se ha calculado la viscosidad reducida de las diferentes soluciones de EPS en metil etil cetona, se realizó el gráfico viscosidad reducida vs.

concentración para obtener la relación lineal que permitió la determinación del peso molecular del polímero.

$$\eta_{red} = 0,8207c + 0,5879$$

Con la relación lineal se aproximó el valor de viscosidad reducida cuando la concentración tiende a cero; es decir, la viscosidad intrínseca del sistema polímero – solvente fue 0,5879 mL/g. Este valor se reemplazó en la ecuación [1.5] para determinar el peso molecular del EPS, para lo cual fue necesario los valores de las constantes de Mark – Houwink para metil etil cetona tomados de Romo (1981), p. 139.

$$[\eta] = K\bar{M}^a$$

Donde:

$$a = 0,58$$

$$K = 3,90 \cdot 10^{-2}$$

$$0,5879 = 3,90 \cdot 10^{-2} \times \bar{M}^{0,58}$$

$$\bar{M} = 107,51 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} = 107\,510 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

ANEXO III

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE FLUIDEZ DE LOS POLIESTIRENOS RECICLADOS

En las siguientes tablas se recogen los datos experimentales proporcionados por el medidor del índice de fluidez y los valores necesarios para el cálculo del MFI de cada poliestireno obtenido por cada ensayo.

Tabla AIII.1. Datos para determinación del MFI del poliestireno 10 % EPS - 1/1 THF/EG

Disolución 10 % EPS y 1/1 THF/EG								
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm ³ /10min)	V (cm ³)	δ (g/cm ³)	MFI (g/10min)	
1	2,84	1,248	0,0770	18,7300	0,0887	0,8685	16,2676	
2	2,99	1,305	0,0934	18,6250	0,0928	1,0063	18,7425	
3	2,81	1,244	0,0874	18,8460	0,0883	0,9902	18,6619	
4	2,94	1,301	0,0908	18,8780	0,0925	0,9816	18,5306	
5	2,82	1,239	0,0866	18,7620	0,0882	0,9821	18,4255	
				MVR med	18,7682		MFI med	18,1256
				MVR des	0,1001		MFI des	1,0457

Tabla AIII.2. Datos para determinación del MFI del poliestireno 10 % EPS – 1/2 THF/EG

Disolución 10% EPS y precipitación 1/2 THF/EG								
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm ³ /10min)	V (cm ³)	δ (g/cm ³)	MFI (g/10min)	
1	3,17	1,248	0,0768	16,7720	0,0886	0,8667	14,5363	
2	3,30	1,305	0,0932	16,8460	0,0927	1,0059	16,9455	
3	3,12	1,244	0,0888	16,9780	0,0883	1,0058	17,0769	
4	3,25	1,301	0,0915	17,0890	0,0926	0,9885	16,8923	
5	3,07	1,239	0,0865	17,2230	0,0881	0,9816	16,9055	
				MVR med	16,9816		MFI med	16,4713
				MVR des	0,1818		MFI des	1,0842

Tabla AIII.3. Datos para determinación del MFI del poliestireno 10 % EPS – 1/3 THF/EG

Disolución 10 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG							
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm³/10min)	V (cm³)	δ (g/cm³)	MFI (g/10min)
1	2,63	1,248	0,0863	20,2390	0,0887	0,9728	19,6882
2	2,80	1,305	0,0875	19,8740	0,0927	0,9434	18,7500
3	2,69	1,244	0,0790	19,7280	0,0884	0,8932	17,6208
4	2,77	1,301	0,0897	20,0350	0,0925	0,9698	19,4296
5	2,64	1,239	0,0889	19,9810	0,0879	1,0112	20,2045
				MVR med	19,9714		
				MVR des	0,1901	MFI med	19,1386
						MFI des	0,9972

Tabla AIII.4. Datos para determinación del MFI del poliestireno 20 % EPS – 1/1 THF/EG

Disolución 20 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG							
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm³/10min)	V (cm³)	δ (g/cm³)	MFI (g/10min)
1	2,76	1,248	0,0820	19,3000	0,0888	0,9236	17,8261
2	2,85	1,305	0,0901	19,5260	0,0927	0,9714	18,9684
3	2,72	1,244	0,0880	19,4960	0,0884	0,9957	19,4118
4	2,85	1,301	0,0925	19,4600	0,0924	1,0007	19,4737
5	2,70	1,239	0,0811	19,5380	0,0879	0,9224	18,0222
				MVR med	19,4640		
				MVR des	0,0965	MFI med	18,7404
						MFI des	0,7733

Tabla AIII.5. Datos para determinación del MFI del poliestireno 20 % EPS – 1/2 THF/EG

Disolución 20 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG							
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm³/10min)	V (cm³)	δ (g/cm³)	MFI (g/10min)
1	2,86	1,248	0,0839	18,6120	0,0887	0,9457	17,6014
2	3,00	1,305	0,0840	18,5380	0,0927	0,9062	16,8000
3	2,81	1,244	0,0876	18,8460	0,0883	0,9925	18,7046
4	2,92	1,301	0,0921	19,0200	0,0926	0,9950	18,9247
5	2,78	1,239	0,0878	19,0180	0,0881	0,9964	18,9496
				MVR med	18,8068		
				MVR des	0,2246	MFI med	18,1961
						MFI des	0,9566

Tabla AIII.6. Datos para determinación del MFI del poliestireno 20 % EPS – 1/3 THF/EG

Disolución 20 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG								
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm³/10min)	V (cm³)	δ (g/cm³)	MFI (g/10min)	
1	2,75	1,248	0,0832	19,3140	0,0885	0,9399	18,1527	
2	2,76	1,305	0,0884	20,1910	0,0929	0,9518	19,2174	
3	2,61	1,244	0,0776	20,3170	0,0884	0,8780	17,8391	
4	2,69	1,301	0,0908	20,6310	0,0925	0,9817	20,2528	
5	2,68	1,239	0,0858	19,7270	0,0881	0,9737	19,2090	
				MVR med	20,0360		MFI med	18,9342
				MVR des	0,5181		MFI des	0,9623

Tabla AIII.7. Datos para determinación del MFI del poliestireno 30 % EPS – 1/1 THF/EG

Disolución 30 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG								
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm³/10min)	V (cm³)	δ (g/cm³)	MFI (g/10min)	
1	3,31	1,248	0,0908	16,0930	0,0888	1,0228	16,4592	
2	3,42	1,305	0,0808	16,2940	0,0929	0,8700	14,1754	
3	3,21	1,244	0,0800	16,5340	0,0885	0,9044	14,9533	
4	3,37	1,301	0,0920	16,4700	0,0925	0,9945	16,3798	
5	3,25	1,239	0,0858	16,2600	0,0881	0,9742	15,8400	
				MVR med	16,3302		MFI med	15,5615
				MVR des	0,1758		MFI des	0,9803

Tabla AIII.8. Datos para determinación del MFI del poliestireno 30 % EPS – 1/2 THF/EG

Disolución 30 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG								
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm³/10min)	V (cm³)	δ (g/cm³)	MFI (g/10min)	
1	2,77	1,248	0,1005	19,2170	0,0887	1,1328	21,7690	
2	2,91	1,305	0,0862	19,1370	0,0928	0,9287	17,7732	
3	2,73	1,244	0,0875	19,4250	0,0884	0,9900	19,2308	
4	2,86	1,301	0,0877	19,4050	0,0925	0,9481	18,3986	
5	2,77	1,239	0,0739	19,1010	0,0882	0,8380	16,0072	
				MVR med	19,2570		MFI med	18,6357
				MVR des	0,1504		MFI des	2,1143

Tabla AIII. 9. Datos para determinación del MFI del poliestireno 30 % EPS – 1/3 THF/EG

Disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG							
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm ³ /10min)	V (cm ³)	δ (g/cm ³)	MFI (g/10min)
1	2,13	1,248	0,0784	25,0090	0,0888	0,8831	22,0845
2	2,29	1,305	0,0912	24,8780	0,0950	0,9605	23,8952
3	2,14	1,244	0,0891	24,8170	0,0885	1,0066	24,9813
4	2,31	1,301	0,0925	24,0220	0,0925	1,0002	24,0260
5	2,30	1,239	0,0883	22,9840	0,0881	1,0022	23,0348
				MVR med	24,3420		
				MVR des	0,8521		
						MFI med	23,6044
						MFI des	1,0946

El ejemplo de cálculo se realiza en base a los datos experimentales del poliestireno 30 % EPS – 1/3 THF/EG muestra número 5. De modo que, para el cálculo del MFI correspondiente se multiplicó el valor de la velocidad de flujo en volumen o MVR, que es el dato directo proporcionado por el plastómero, por la densidad del polímero. Para lo cual, se determinó el volumen del polímero:

$$V = MVR \times t \quad \text{[AIII.1]}$$

$$V_5 = 22,9840 \frac{\text{cm}^3}{10 \text{ min}} \times 2,30 \text{ s} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,0881 \text{ cm}^3$$

En base a este volumen se calculó la densidad del polímero:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{[AIII.2]}$$

$$\rho_5 = \frac{0,0883}{0,0881} = 1,0022 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$MFI = MVR \times \rho \quad \text{[AIII.3]}$$

$$MFI_5 = 22,9840 \frac{\text{cm}^3}{10 \text{ min}} \times 1,0022 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 23,0348 \frac{\text{g}}{10 \text{ min}}$$

Una vez calculado el MFI de las 5 muestras que se obtienen en el medidor de fluidez, se determina el MFI promedio del poliestireno recuperado por el ensayo 30 % EPS – 1/3 THF/EG.

$$\overline{MFI} = \frac{MFI_1 + MFI_2 + MFI_3 + MFI_4 + MFI_5}{5} \quad [AIII.4]$$

$$\overline{MFI} = \frac{22,0845 + 23,8952 + 24,9813 + 24,0260 + 23,0348}{5} = 23,6044 \frac{g}{10 \text{ min}}$$

Tabla AIII.10. Datos para determinación del MFI del poliestireno 40 % EPS – 1/1 THF/EG

Disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG							
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm ³ /10min)	V (cm ³)	δ (g/cm ³)	MFI (g/10min)
1	2,01	1,248	0,0404	26,4490	0,0886	0,4560	12,0597
2	2,13	1,305	0,0945	26,1140	0,0927	1,0194	26,6197
3	2,01	1,244	0,0855	26,3700	0,0883	0,9679	25,5224
4	2,09	1,301	0,0906	26,5220	0,0924	0,9807	26,0096
5	1,99	1,239	0,0873	26,5610	0,0881	0,9910	26,3216
				MVR med	26,4032		
				MVR des	0,1774		
						MFI med	23,3066
						MFI des	6,3003

Tabla AIII.11. Datos para determinación del MFI del poliestireno 40 % EPS – 1/2 THF/EG

Disolución 40 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG							
Muestra	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Masa (g)	MVR (cm ³ /10min)	V (cm ³)	δ (g/cm ³)	MFI (g/10min)
1	2,48	1,248	0,0853	23,2390	0,0961	0,8880	20,6371
2	2,87	1,305	0,0880	19,8470	0,0949	0,9270	18,3972
3	2,69	1,244	0,0789	19,7820	0,0887	0,8896	17,5985
4	2,76	1,301	0,0875	20,0350	0,0922	0,9494	19,0217
5	2,53	1,239	0,0861	19,9610	0,0842	1,0229	20,4190
				MVR med	20,5728		
				MVR des	1,4937		
						MFI med	19,2147
						MFI des	1,3030

Con el fin de eliminar valores divergentes entre las medidas de MFI de cada grupo de ensayos se realizó el cálculo del criterio Q. Por ejemplo, en el conjunto de datos del MFI del polímero recuperado por 40 % EPS - 1/1 THF/EG se sospecha que el valor de 12,0597 g/10 min no pertenece al grupo de datos, entonces:

$$Q_c = \frac{|valor\ sospechoso - valor\ próximo|}{valor\ mayor - valor\ menor}$$

$$Q_c = \frac{|12,0597 - 25,5254|}{26,6197 - 12,0597} = 0,925$$

Si $Q_c > Q_{tabulado}$, se trata de un valor divergente.

Dado que el $Q_{tabulado} = 0,717$, para 5 mediciones con el criterio del 95 % de confianza, implica que el criterio Q es mayor al valor de Q tabulado, por tanto el dato sospechoso si es un valor divergente y en consecuencia se descarta. De modo que, los valores promedios de MFI se modifican y se tabulan en la Tabla 3.4. Adicionalmente, se incluye el límite de confianza en cada dato, calculado de la siguiente forma:

$$Límite\ de\ confianza = t \times \frac{desviación\ estándar}{\sqrt{número\ de\ datos(n)}}$$

Determinado para el grupo de 30 % EPS – 1/3 THF/EG, se tiene que la *t de student* es igual a 2,78 para 4 grados de libertad (n-1) con un intervalo de confianza del 95 %, entonces:

$$Límite\ de\ confianza = 2,78 \times \frac{1,0946}{\sqrt{5}} = 1,36$$

Por tanto, el rango dentro del cual se asume que está el valor verdadero de MFI para el grupo de 30 % EPS – 1/3 THF/EG se encuentra entre el siguiente límite de confianza:

$$MFI = 23,6044 \pm 1,36\ g/10\ min$$

ANEXO IV

HOJAS DE DATOS DE LOS POLIESTIRENOS COMERCIALES

Network Polymers PS CPS 80 1800		Units English ▼	
Network Polymers, Inc. - General Purpose Polystyrene			
Action	Legend (Open)		
✉ 🖨			
General Information			
General			
Material Status	• Commercial: Active		
Availability	• North America		
Features	• Crystal • High Flow		
Appearance	• Clear/Transparent		
Forms	• Pellets		
Processing Method	• Injection Molding		
ASTM & ISO Properties ¹			
Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Specific Gravity	1.05		ASTM D792
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (200°C/5.0 kg)	18	g/10 min	ASTM D1238
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Modulus ²	430000	psi	ASTM D638
Tensile Strength ² (Break)	6900	psi	ASTM D638
Tensile Elongation (Break)	1.0	%	ASTM D638
Impact	Nominal Value	Unit	Test Method
Notched Izod Impact (0.125 in)	0.25	ft-lb/in	ASTM D256A
Hardness	Nominal Value	Unit	Test Method
Rockwell Hardness (L-Scale)	71		ASTM D785
Thermal	Nominal Value	Unit	Test Method
Deflection Temperature Under Load (264 psi, Unannealed)	185	°F	ASTM D648
Vicat Softening Temperature	200	°F	ASTM D1525
Notes			
¹ Typical properties: these are not to be construed as specifications.			
² 2.0 in/min			

Figura AIV.1. Hoja de datos del poliestireno con MFI 18 g/10 min de la casa comercial Network Polymers

Related Categories	Dielectric Materials, Hydrophobic Polymers, Materials Science, Organic Field Effect Transistor (OFET) Materials, Organic and Printed Electronics, More...
melt index	6.0-9.0 g/10 min (200°C/5kg)
mol wt	average M_w ~192,000
refractive index	$n_{20/D}$ 1.59
transition temp	softening point 107 °C (Vicat, ASTM D 1525)

Figura AIV.2. Propiedades del poliestireno comercial ALDRICH 441147

430110 ALDRICH

Polystyrene

melt index 12.0-16.0 g/10 min (200°C/5kg)

Synonym: PS

MSDS

SIMILAR PRODUCTS

Linear Formula $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$ | MDL number MFCD00084450

Properties

melt index	12.0-16.0 g/10 min (200°C/5kg)
transmittance	90%
refractive index	$n_{20/D}$ 1.59
transition temp	softening point 101 °C (Vicat, ASTM D 1525)
density	1.04 g/mL at 25 °C

Description

Physical form

Thermoplastic amorphous polymer.

Application

Extrusion molded foamed packaging, dinnerware, bottles and toys. Injection molded packaging containers, toys and disposable cutlery.

Features and Benefits

Hard, clear moderately strong polymer, biologically inert, good dimensional stability. Susceptible to exterior (UV) degradation.

Figura AIV.3. Hoja de datos del poliestireno con MFI 12 – 16 g/10 min de la casa comercial Sigma - Aldrich

Polystyrene crystal

Description Properties*	References	Melt Flow Index	Vicat Temperature		Tensile Modulus	Tensile Strength at break	Elongation at break	Flexural Modulus	Extrusion	Injection	Typical Applications
			°C (1kg)	°C (5kg)							
Units		g/10 min			MPa	MPa	%	MPa			
Test Method	ISO	1133 H	306A50	306B50	527-2	527-2	527-2	178			
	ASTM	D 1238 G	D 1525 A		D 638 M	D 638 M	D 638 M	D 790			
	JIS	K 7210-8	K 7206 A	K 7206 B	K 7113	K 7113	K 7113	K 7203			
High heat resistance, high molecular weight	1160	2.4	105	101	3200	48	3	2900	●	●	Foam trays and boxes. Heat resistant packaging. Industrial sheets
High molecular weight	1340	4.0	98	93	3100	44	2,5	2900	●	●	HIPS dilution : disposable, sheets for thermoforming, CD & DVD boxes. Toys. Injection moulding
High heat, easy flow	1450 N	6.5	106	102	3200	48	3	2900	●		Insulation boards
Easy flow	1540	12.0	91	86	3100	42	2	2900	●	●	General purpose injection moulding grade. HIPS dilution in packaging. Glossy coextruded top layer
Very easy flow	1610	20.0	90	85	3100	42	2	2900	●	●	High fluidity injection moulding : thin walls. Glossy coextruded top layer
Very easy flow	1960 N	30.0	105	101	3100	35	2	2900	●		Insulation boards

Figura AIV.4. Características de los poliestirenos con MFI 20 y 30 g/10 min de la casa comercial Total Petrochemicals

Crystal Polystyrene (PSC)

Product name	Melt Index (5 Kg-200°C) g/10'	Flexural Modulus psi	Vicat Temp D1525 °F	Applications / Markets
500	14	4.6	206	Injection, Disposable, Profiles, Blown industrial packaging, Media & jewel boxes, Compounds & masterbatches, Corrugated & sheets, Compounds & masterbatches, Containers, Food & beverage packaging, Furnitures & outdoor articles, Industrial Packaging, Packaging general, Foam
CX5243	23	4.8	222	Compounds & masterbatches, Injection, Disposable, Foam articles, Expandable Polystyrene, Compounds & masterbatches, Foam, Insulation

Figura AIV.5. Características del poliestireno con MFI 14 g/10 min de la casa comercial Total Refining & Chemicals

TOTAL PETROCHEMICALS		CRYSTAL POLYSTYRENE CX5243	
Technical Data Sheet Produced in the United States			
Description			
TOTAL Petrochemicals CX5243 is a very high flow, high heat crystal polystyrene. The very low viscosity of this grade combined with its high heat resistance makes it particularly suitable for the production of extrusion foam board (XPS) with blowing agents such as CO ₂ and HFC. It is also ideal for use as a masterbatch carrier.			
Applications			
<ul style="list-style-type: none"> Insulation foam board Masterbatch carrier Modifier for thermoplastic elastomers and rubbers 			
General Information			
<ul style="list-style-type: none"> This material complies with FDA requirements as described in 21 CFR §177.1640. USP Class VI Material Safety Data Sheets are available to help customers satisfy their safety needs. 			
Properties			
Rheological Properties	ASTM Test	Unit	Typical Value
Melt Flow (200°C-5kg)	D-1238	g/10mn	23
Thermal Properties			
Heat Distortion - Annealed	D-648	°F	204
Vicat Softening	D-1525	°F	222
Tensile Properties			
Strength	D-638	psi	4000
Modulus	D-638	psi (10 ⁵)	4.3
Flexural Properties			
Strength	D-790	psi	6700
Modulus	D-790	psi (10 ⁵)	4.8
Other Properties			
Density		g/cm ³	1.04
Linear Shrinkage	D-955	in/in	.004 - .007
Moisture		%	<0.1

Polystyrene

Figura AIV.6. Hoja de datos del poliestireno con MFI 23 g/10 min de la casa comercial Total Refining & Chemicals

Tabla AIV.1. Información recopilada de los poliestirenos disponibles en el mercado

Casa comercial	Índice de fluidez (g/10 min)	Tipo de poliestireno	Extrusión	Inyección	Aplicaciones
Network Polymers	18,0	General Purpose Polystyrene	x		Varios productos finales
Total Petrochemicals	20,0	Poliestireno cristal	x	x	Paredes delgadas. Capa superior coextruida satinada
	30,0		x		Paneles aislantes
Total Refining & Chemicals	14,0	Poliestireno cristal		x	Perfiles y láminas, contenedores, cajas, muebles y artículos para exteriores, empaques en general, EPS, carga masterbatch
	23,0		x	x	Paneles aislantes, desechables, espuma flex, poliestireno de extrusión (XPS), carga masterbatch, modificador para elastómeros termoplásticos y cauchos.
Sigma – Aldrich	12,0 – 16,0	Poliestireno (430110)	x	x	Espuma de embalaje, platos, botellas, envases, juguetes y cubiertos desechables

(Network Polymers, 2015; Sigma – Aldrich, 2015; Total Petrochemicals, 2015; Total Refining & Chemicals, 2015)

ANEXO V

DSC DE LOS POLIESTIRENOS RECICLADOS

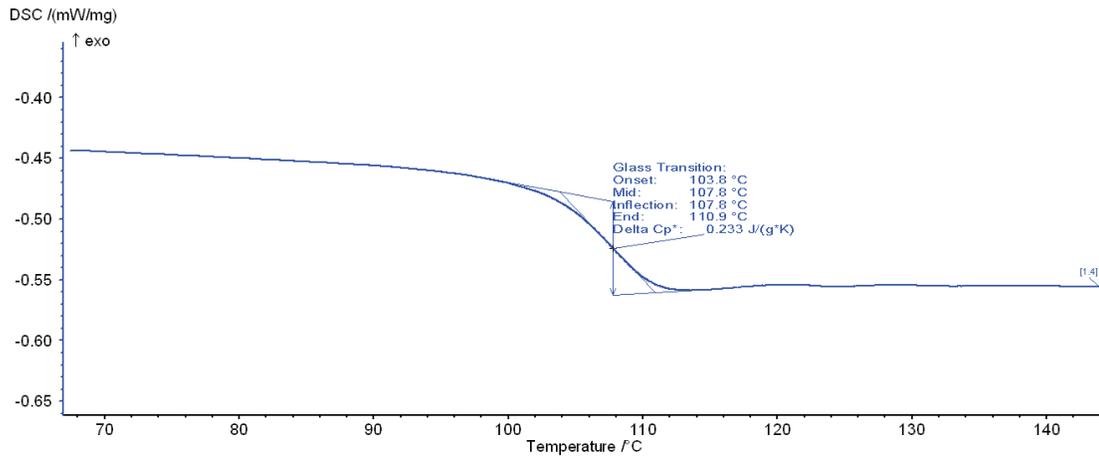


Figura AV.1. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

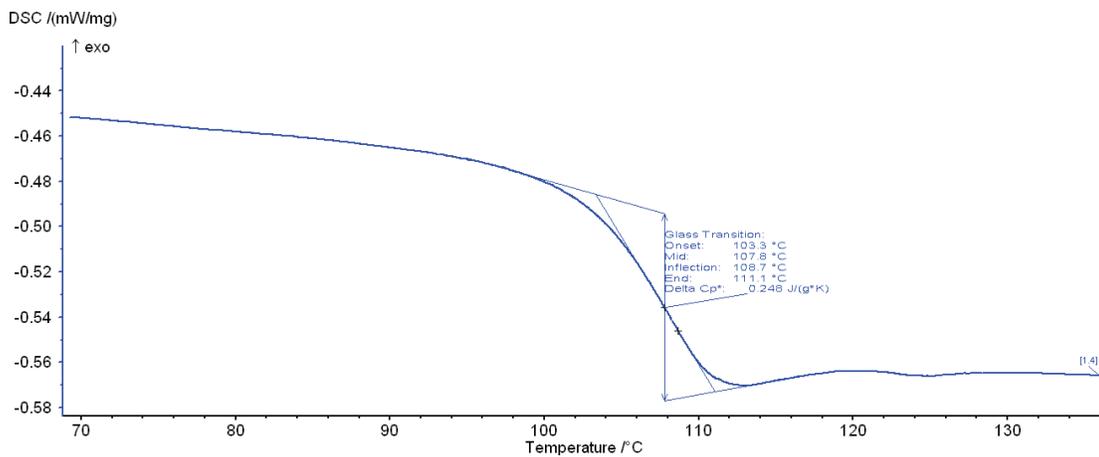


Figura AV.2. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

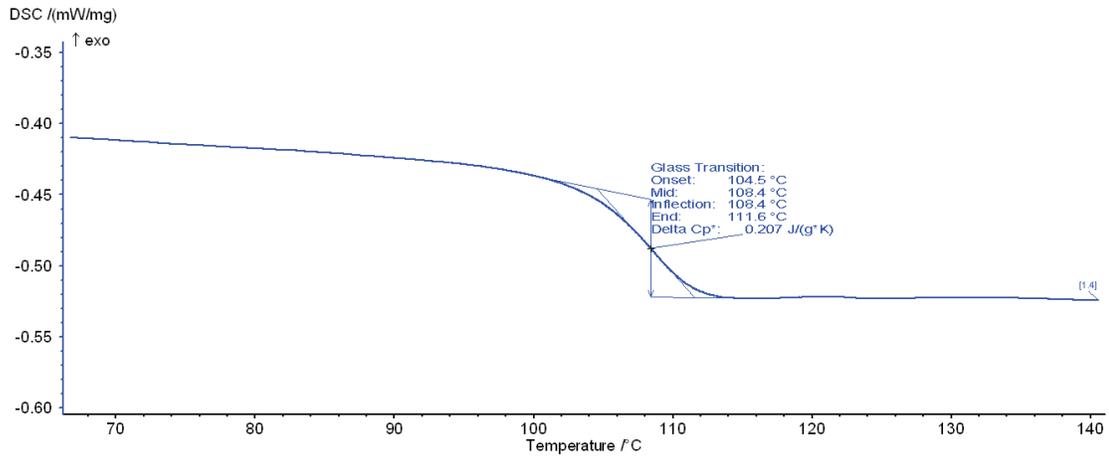


Figura AV.3. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 10 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG

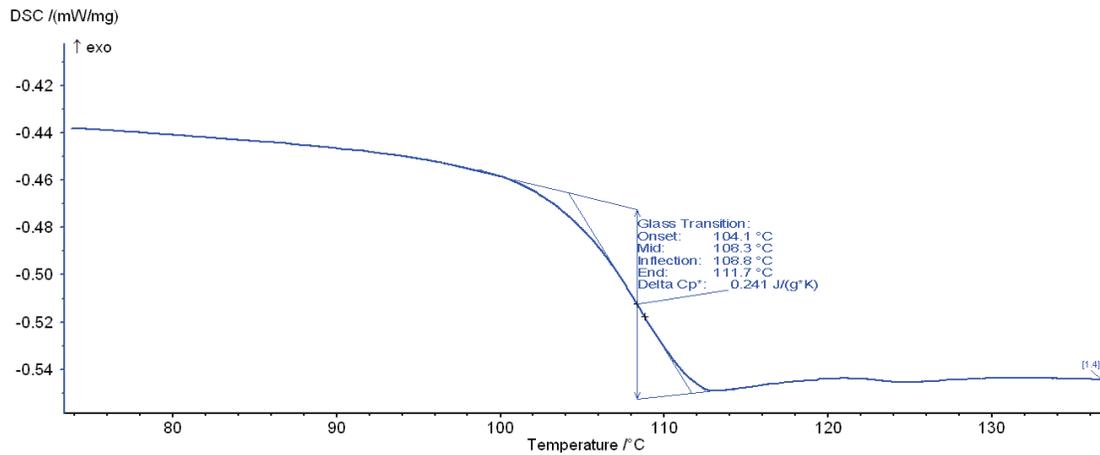


Figura AV.4. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

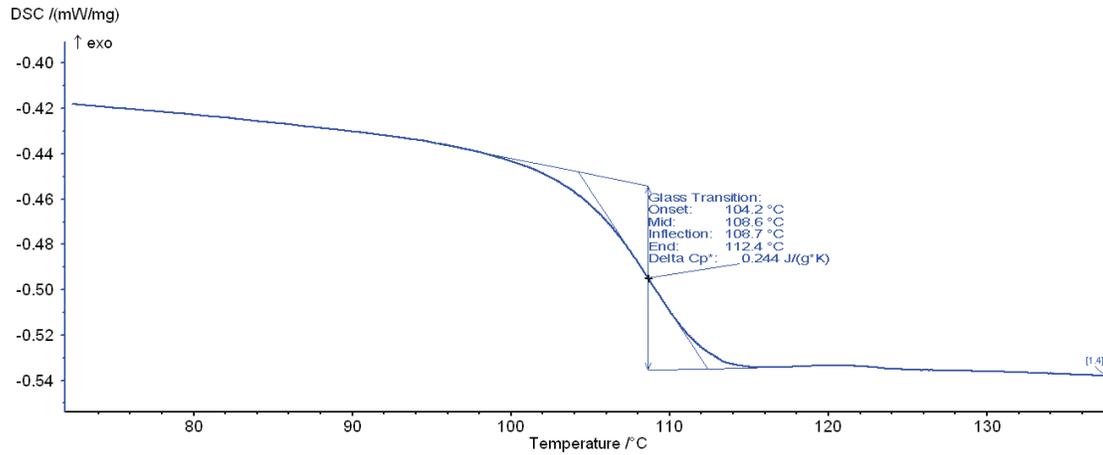


Figura AV.5. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

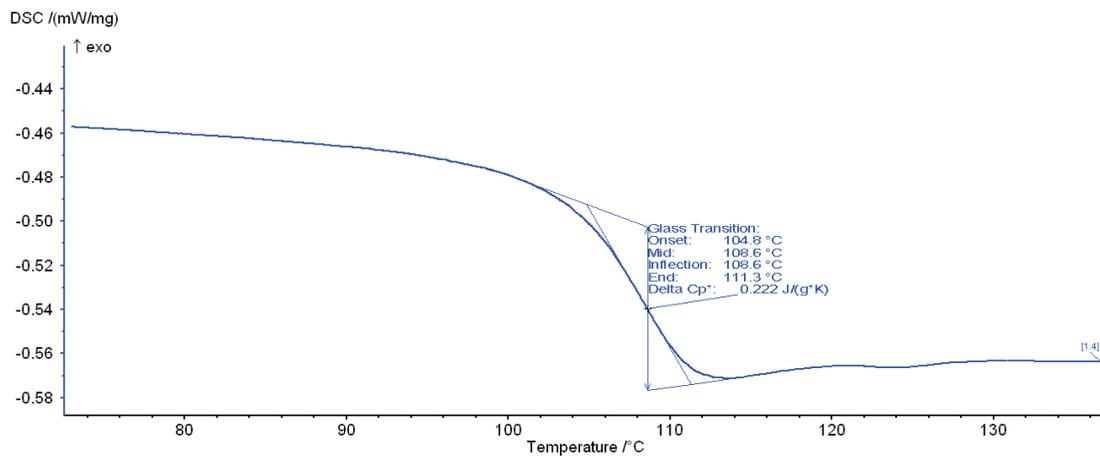


Figura AV.6. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 20 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG

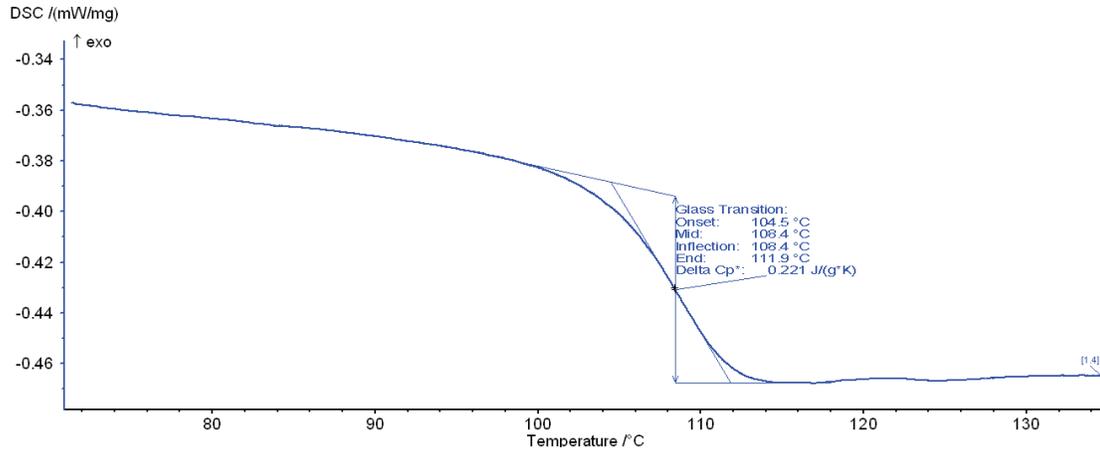


Figura AV.7. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

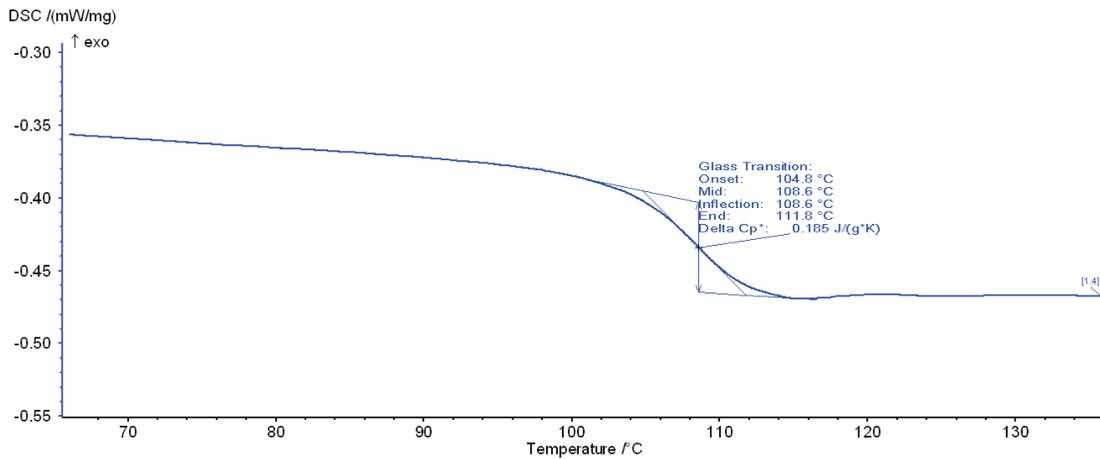


Figura AV.8. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 30 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

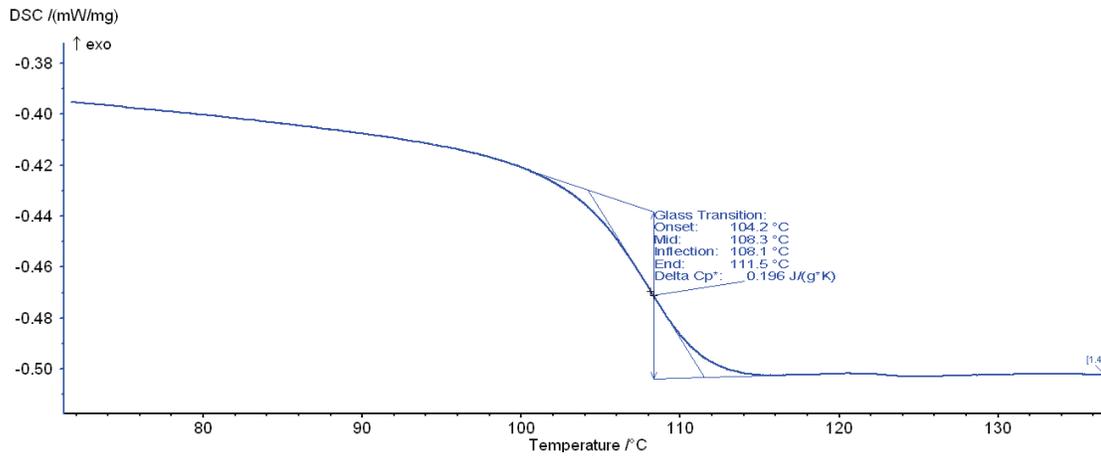


Figura AV.9. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/1 THF/EG

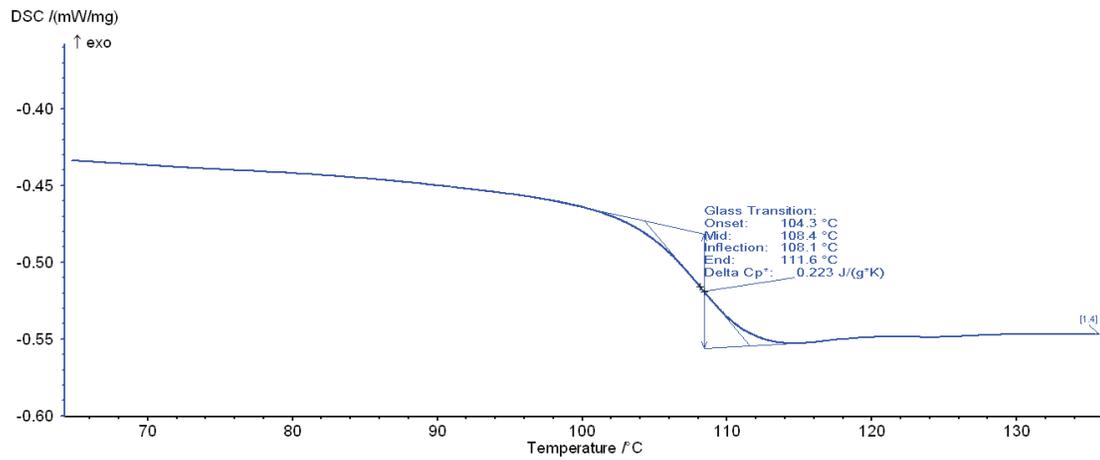


Figura AV.10. Termograma correspondiente al análisis por calorimetría diferencial de barrido del poliestireno recuperado por el ensayo disolución 40 % EPS y precipitación 1/2 THF/EG

ANEXO VI

PUREZA DE LOS PRODUCTOS DE LA DESTILACIÓN

Por medio de la relación lineal de la gráfica índice de refracción vs. concentración, se calculó la pureza del destilado y residuo de las dos destilaciones realizadas para complementar el proceso de reciclaje de EPS.

La relación lineal para la destilación de la solución THF – EG fue:

$$n = -0,0182c + 1,4263$$

A partir de la misma se determinó que, para un índice de refracción de 1,4085 como es el del destilado, la concentración en la que se encuentra con respecto al tetrahidrofurano es 97,80 %. De la misma manera se procedió para determinar la pureza del residuo.

$$1,4085 = -0,0182 \times c + 1,4263$$

$$c = 97,80 \% \rightarrow THF \therefore 100 - 97,80 = 2,20 \% \rightarrow EG$$

Así también se consideró la relación lineal para la destilación de la solución alcohol – EG:

$$n = -0,0479c + 1,4272$$

A partir de la misma se determinó que, para un índice de refracción de 1,3775 como es el del destilado, la concentración en la que se encuentra con respecto al isopropanol es 100 %.

$$1,3775 = -0,0479 \times c + 1,4272$$

$$c = 103,76 \% \rightarrow alcohol \approx 100 \% isopropanol$$

ANEXO VII

RENDIMIENTO DE LA RECUPERACIÓN DE REACTIVOS

El rendimiento de la destilación se determinó por la cantidad de solvente y agente precipitante recuperados en base a la composición de la solución filtrada THF – EG que ingresó al proceso de recuperación. De la misma forma, por la cantidad de alcohol para lavado y agente precipitante recuperados en base a la composición de la solución filtrada alcohol – EG que ingresó a la otra destilación.

Entró alrededor de 560 mL de la solución filtrada THF – EG a la destilación, el contenido de tetrahidrofurano y etilenglicol que constituyen la corriente de entrada a la recuperación son una función del mejor ensayo 30 % EPS – 1/3 THF/EG; es decir:

$$\begin{array}{l} \text{solución filtrada THF – EG} \rightarrow 81,91 \% w/w \rightarrow 78,13 \% v/v \text{ EG} \\ \phantom{\text{solución filtrada THF – EG}} \rightarrow 18,09 \% w/w \rightarrow 21,87 \% v/v \text{ THF} \end{array}$$

Tabla AVII.1. Volúmenes recuperados después de la destilación de la solución THF – EG

Destilación solución THF - EG			
Volumen (mL)		THF (mL)	EG (mL)
Solución THF - EG	~560	122,47	437,53
Destilado	~94	91,93	2,07
Residuo	~454	19,98	434,02
Pérdida volátiles	12		

En la Tabla AVII.1 se muestran los valores respectivos a la composición de línea de corriente a destilar, a partir de los mismos se calculó el rendimiento de la destilación en base al tetrahidrofurano en el destilado y al etilenglicol en el residuo determinados por la pureza de los productos.

$$\eta_{THF} = \frac{\text{solvente en el destilado}}{\text{solvente que ingresa a la destilación}} \times 100 \quad \text{[AVII.1]}$$

$$\eta_{THF} = \frac{91,93}{122,47} \times 100 = 75,06 \%$$

Con respecto al etilenglicol el rendimiento fue:

$$\eta_{EG} = \frac{\text{precipitante en el residuo}}{\text{precipitante que ingresa a la destilación}} \times 100 \quad [\text{AVII.2}]$$

$$\eta_{EG} = \frac{434,02}{437,53} \times 100 = 99,20 \%$$

La recuperación de tetrahidrofurano fue del 75 %, existe una pérdida de reactivo alrededor de 12 mL debido a la volatilidad del tetrahidrofurano y en el residuo se tiene aún 20 mL por destilar, con base a la pureza del producto. La recuperación del etilenglicol fue alta, no existen pérdidas dado a que no es un compuesto volátil. Puede haber errores experimentales durante la medición de los volúmenes recuperados.

Tabla AVII.2. Volúmenes recuperados después de la destilación de la solución alcohol – EG

Destilación solución alcohol - EG			
Volumen (mL)		Isopropanol (mL)	Etilenglicol (mL)
Solución alcohol - EG	~290	272,63	17,37
Destilado	~252	252,00	-
Residuo	~24	6,86	17,14
Pérdida volátiles	14		

Aproximadamente, 290 mL de la solución filtrada alcohol – EG fueron destinados a la destilación, el contenido de alcohol y etilenglicol que constituyen la corriente de entrada a la recuperación son una función del mejor ensayo 30 % EPS – 1/3 THF/EG; es decir:

$$\text{solución filtrada alcohol – EG} \rightarrow \begin{array}{l} 91,72 \% \text{ w/w} \rightarrow 94,01 \% \text{ v/v isopropanol} \\ 8,28 \% \text{ w/w} \rightarrow 5,99 \% \text{ v/v etilenglicol} \end{array}$$

Los valores respectivos a la composición de línea de corriente a destilar se observan en la Tabla AVII.2, a partir de los mismos se calculó el rendimiento de la destilación.

$$\eta_{alcohol} = \frac{\text{reactivo de lavado en el destilado}}{\text{reactivo de lavado que ingresa a la destilación}} \times 100$$
$$\eta_{alcohol} = \frac{252}{272,63} \times 100 = 92,43 \%$$

La recuperación del alcohol fue alta; sin embargo, existe una pérdida de reactivo debido a la volatilidad del isopropanol. Aproximadamente, 14 mL se perdieron por la volatilización y en el residuo se encuentran aún 6,86 mL por destilar según la pureza del producto. Puede haber errores experimentales durante la medición de los volúmenes recuperados.

ANEXO VIII

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE LA PLANTA PILOTO

La capacidad de la planta piloto de reciclaje de EPS propuesta en el proyecto, tiene base en la información proporcionada por la Cámara de Industrias de Guayaquil (2012). El 10 % de las importaciones de EPS fue la referencia tomada para estimar la base de cálculo para el procesamiento de la planta.

De acuerdo a la Cámara de Industrias de Guayaquil (2012) entre los meses de enero a julio, el Ecuador importó 4 586,42 toneladas de poliestireno.

$$1\,396,76 \frac{\text{ton}}{6 \text{ meses}} \times \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} \times \frac{1\,000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 7\,759,78 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

El 10% de estas importaciones será:

$$7\,759,78 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 0,10 = 775,98 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Para facilidad de cálculo se reporta como base del balance 770 kg de EPS/día para la capacidad de reprocesamiento de la planta a escala piloto.

ANEXO IX

BALANCE DE MASA

El balance de masa correspondiente a la planta piloto se realizó tomando como referencia el porcentaje de pérdida en peso por los procesos de secado y molienda, conservando la proporción de contaminación que tiene el polímero precipitado obtenido por el mejor ensayo 30 % EPS – 1/3 THF/EG. En la Tabla AIX.1 se resumen los datos tomados durante la experimentación.

Tabla AIX.1. Datos experimentales tomados en la ejecución del proceso de reciclaje

Ensayo		Masa EPS (g)	Masa precipitado (g)	Masa polímero secado 1h (g)	Pérdida en peso (%)	Masa polímero molido (g)	Pérdida por operación (%)	Masa polímero lavado (g)	Masa PS secado 11h (g)	Pérdida en peso (%)
Proporción EPS	Relación THF/EG									
10%	1/1	15,00	28,25	18,70	33,81	16,62	11,09	29,09	13,75	52,74
	1/2		28,62	20,54	28,22	18,14	11,68	31,75	13,48	57,54
	1/3		27,19	20,28	25,43	18,15	10,48	31,76	13,64	57,04
20%	1/1	34,00	67,13	48,19	28,22	35,18	27,00	61,57	24,99	59,41
	1/2		62,31	44,73	28,22	38,44	14,07	67,26	29,63	55,95
	1/3		61,63	46,30	24,87	38,02	17,88	66,54	28,15	57,69
30%	1/1	58,50	110,16	79,08	28,22	69,84	11,68	122,22	52,10	57,37
	1/2		113,70	82,34	27,58	71,52	13,14	125,16	50,97	59,27
	1/3		108,00	80,30	25,65	72,02	10,31	126,36	52,65	58,33
40%	1/1	90,72	185,61	120,99	34,81	111,50	7,84	195,13	84,62	56,64
	1/2		169,07	121,37	28,22	111,60	8,05	195,30	84,14	56,92

Una vez que se conocen las relaciones de importancia, se realizó el balance de masa para una planta piloto con capacidad para 770 kg/día de residuos de EPS. Para lo cual, se usaron las líneas de corriente vistas en el PDF de la planta piloto.

Se inicia con la disolución realizada con una relación del 30 % EPS y en consecuencia la corriente (2) corresponde al 70 % de una corriente que representa a la disolución. Por lo tanto:

$$0,30 \times (\text{disolución}) = (1) = 770 \text{ kg EPS/día}$$

$$(\text{disolución}) = \frac{770}{0,30} = 2\,566,67 \text{ kg/día}$$

$$0,70 \times (\text{disolución}) = (2)$$

$$(2) = 0,70 \times 2\,566,67 = 1\,796,67 \text{ kg THF/día}$$

$$(2) = 1\,796,67 \frac{\text{kg THF}}{\text{día}} \times \frac{\text{m}^3}{878,42 \text{ kg}} = 2,04 \text{ m}^3 \text{ THF/día}$$

Considerando que la densidad del tetrahidrofurano a 20 °C es 878,42 kg/m³, de acuerdo a la gravedad específica del compuesto 0,88; se estimó que es necesario 2,04 m³ de solvente para disolver 770 kg de EPS por día.

Tomando en cuenta que se usa la relación volumétrica 1/3 THF/EG, el agente precipitante requerido para precipitar todo el polímero será 3 veces el volumen del solvente utilizado en la disolución.

$$(3) = 3 \times (2) \text{ en volumen}$$

$$(3) = 3 \times 2,04 = 6,14 \text{ m}^3 \text{ EG/día}$$

Se requerirá 6,14 m³ de etilenglicol para precipitar el polímero disuelto en tetrahidrofurano, también expresado como 6834,37 kg de etilenglicol por día, al usar la densidad del diol determinada con el Manual de Perry (2001), p. 2-102.

$$(3) = 6,14 \frac{\text{m}^3 \text{ EG}}{\text{día}} \times 1\,113,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6\,834,37 \text{ kg EG/día}$$

De acuerdo al diagrama de flujo la línea de corriente (4) será la suma de las corrientes (1), (2) y (3), que representa al polímero precipitado y la solución THF – EG resultante del proceso de disolución – precipitación.

$$(1) + (2) + (3) = (4)$$

$$(4) = 770 + 1\,796,67 + 6\,834,37 = 9\,401,04 \text{ kg/día}$$

La línea (4) está compuesta por 72,70 % de etilenglicol, 19,11 % de tetrahidrofurano y 8,19 % de poliestireno.

Se separa por filtración al polímero precipitado de la solución de THF – EG, el polímero contendrá aproximadamente un 46 % de la solución después de la filtración, este porcentaje se tomó de los datos experimentales a escala laboratorio. Tomando en cuenta que el polímero precipitado obtenido después del ensayo más adecuado pesó 108 g; es decir, 49,50 g más que lo disuelto, por lo tanto este fue considerado como el contenido de contaminación.

$$\% \text{ contaminación} = \frac{49,50}{108} \times 100 = 45,83 \% \text{ solución THF – EG en el precipitado}$$

De modo que, para la escala piloto aproximadamente el 54 % del polímero precipitado que ha sido filtrado corresponde al poliestireno y el resto a la solución THF – EG en el polímero.

$$\text{poliestireno precipitado} = 0,54 \times (6)$$

$$(6) = \frac{770}{0,54} = 1\,421,45 \text{ kg/día}$$

El polímero precipitado contendrá un exceso de solución THF – EG igual a:

$$\text{extra solución THF – EG} = 0,46 \times (6)$$

$$\text{extra solución THF – EG} = 0,46 \times 1\,421,45 = 651,45 \text{ kg sol./día}$$

De acuerdo al PDF la corriente (5) que representa la solución THF – EG filtrada, que ha sido separada del precipitado, será igual a:

$$(5) = (4) - (6)$$

$$(5) = 9\,401,04 - 1\,421,45 = 7\,979,59 \text{ kg solución THF – EG/día}$$

La corriente (5) sigue a la destilación para recuperar el solvente y el agente precipitante que conforman la solución THF - EG.

Continuando con el polímero, en la siguiente operación se evapora el contenido de solvente del polímero precipitado. Según el ensayo por el mejor ensayo se conoció que el porcentaje de pérdida en peso debido al secado es del 25,65 %, a partir de este valor se calculó el evaporado.

$$\% \text{ pérdida por secado} = \frac{\text{Evaporado}}{(6)} \times 100$$

$$\text{Evaporado} = \frac{25,65}{100} \times 1\,421,45 = 364,60 \text{ kg THF/día}$$

Por lo que después del secado el polímero precipitado solo contendrá etilenglicol, de modo que la corriente (7) estará compuesta por un 72,86 % de poliestireno y 27,14 % de etilenglicol.

$$(6) = \text{Evaporado} + (7)$$

$$(7) = 1\,421,45 - 364,60 = 1\,056,85 \text{ kg/día}$$

Los 770 kg de poliestireno que han sido reciclados están contaminados con 286,85 kg de etilenglicol y conforman la corriente (7), llamada polímero seco. Esta línea ingresa a la molienda donde existen pérdidas del material; sin embargo, para modo práctico no se considera el 10 % de pérdidas como ocurre a escala laboratorio debido a que depende del tipo de molino que se use.

Entonces el polímero que sigue al proceso de lavado con isopropanol después de la molienda, es igual a:

$$(8) = (7)$$

$$(8) = 1\,056,85 \text{ kg/día}$$

Se usó una cantidad de alcohol dos veces el peso que se va a lavar, el proceso se repite con isopropanol puro para arrastrar la mayor parte del contenido de etilenglicol en el polímero.

$$(9) = 4 \times (8)$$

$$(9) = 4 \times 1\,056,85 = 4\,227,40 \text{ kg alcohol/día}$$

De acuerdo a la densidad del alcohol, que es de 786,06 kg/m³ según el Manual de Perry (2001), p. 2-102, se requieren 5,38 m³ total para el proceso de lavado del precipitado.

$$(9) = 4\,227,40 \frac{\text{kg alcohol}}{\text{día}} \times \frac{\text{m}^3}{786,06 \text{ kg}} = 5,38 \text{ m}^3 \text{ alcohol/día}$$

De modo que la línea de corriente (10) sale del lavado hacia la filtración para separar el polímero de la solución alcohol – EG. Está compuesta por poliestireno en un 14,57 %, etilenglicol en 5,43 % y 80 % de isopropanol.

$$(10) = (8) + (9)$$

$$(10) = 1\,056,85 + 4\,227,4 = 5\,284,25 \text{ kg/día}$$

A continuación, el polímero lavado separado por la filtración corresponde a la corriente (12) que sigue hacia el secado por 11 horas para eliminar la cantidad de isopropanol que haya contaminado al poliestireno. Mientras que, la solución alcohol – EG filtrada (11) continúa hacia la destilación para recuperar el reactivo de lavado y el agente precipitante remanente.

Las pérdidas en peso debido al proceso de secado por 11 horas es del 58 % aproximadamente, guiándose en el proceso a escala laboratorio. Por lo tanto, se consideró que después del secado se obtiene poliestireno libre de isopropanol, el resto del reactivo de lavado se encuentra en la solución filtrada alcohol – EG.

$$(12) = \text{Evaporado 2} + (13)$$

$$\% \text{ pérdida por secado } 2 = \frac{\text{Evaporado } 2}{(12)} \times 100$$

$$\text{Evaporado } 2 = \frac{58}{100} \times (\text{Evaporado } 2 + (13))$$

Dado a que el método aplicado es disolución 30 % EPS y precipitación 1/3 THF/EG, la corriente de salida del producto está libre de contaminación por etilenglicol de acuerdo al análisis termogravimétrico, por tanto equivale a los 770 kg de residuos alimentados eliminando la incertidumbre de pérdidas de material.

$$(13) = 770 \text{ kg Poliestireno reciclado/día}$$

Por lo que:

$$\text{Evaporado } 2 = \frac{0,58 \times 770}{0,42} = 1\ 063,33 \text{ kg alcohol/día}$$

$$(12) = 1\ 063,33 + 770 = 1\ 833,33 \text{ kg/día}$$

De modo que la corriente que va hacia la destilación es igual a:

$$(11) = (10) - (12)$$

$$(11) = 5\ 284,25 - 1\ 833,33 = 3\ 450,92 \text{ kg solución alcohol - EG/día}$$

Finalmente, se consideran las corrientes (5) y (11) que van a diferentes procesos de destilación para recuperar el solvente, el agente precipitante y el reactivo de lavado. Para el cálculo de sus flujos másicos se consideró la pureza que tienen los productos de destilación, determinados experimentalmente por el índice de refracción. No se consideró pérdidas por volatilización.

$$(5) = (14) + (15)$$

$$(11) = (16) + (17)$$

Donde:

(14): destilado de la solución THF – EG, pureza 97,80 % v/v en tetrahidrofurano

(15): residuo de la solución THF – EG, pureza 95,60 % v/v en etilenglicol

(16): destilado solución alcohol – EG, pureza 100 % v/v en isopropanol

(17): residuo solución alcohol – EG, pureza 71,40 % v/v en etilenglicol

Para determinar el valor de las líneas (14) y (15) se realizó un balance de masa de etilenglicol, que inicia con el contenido de este componente existente en la corriente (4) igual a la cantidad de precipitante entre las corrientes (5) y (6). Dado a que el proceso de secado durante 1 hora solo elimina el tetrahidrofurano remanente, el contenido de etilenglicol en (6) va a ser el mismo que en (7), por tanto:

$$x_{EG} \cdot (6) = y_{EG} \cdot (7)$$

$$x_{EG} \cdot (6) = 286,85 \text{ kg EG/día} \rightarrow 20,18 \% \text{ de (6)}$$

$$EG \text{ en (4)} = (3) = z_{EG} \cdot (5) + x_{EG} \cdot (6)$$

$$z_{EG} \cdot (5) = 6\,834,37 - 286,85 = 6\,547,52 \text{ kg EG/día} \rightarrow 82,05 \% \text{ de (5)}$$

Por lo que el contenido de tetrahidrofurano en la línea (5) es:

$$z_{THF} \cdot (5) = 7\,979,59 - 6\,547,52 = 1\,432,07 \text{ kg THF/día} \rightarrow 17,95 \% \text{ de (5)}$$

Utilizando la pureza que existe en los productos de la destilación de la solución THF – EG, primero se transforma las corrientes en cuestión en volumen y luego se calcula el valor de (14) y de (15).

$$z_{EG} \cdot (5) = 6\,547,52 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{m}^3}{1\,113,81 \text{ kg}} = 5,88 \text{ m}^3 \text{ EG/día}$$

$$z_{THF} \cdot (5) = 1\,432,07 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{m}^3}{878,42 \text{ kg}} = 1,63 \text{ m}^3 \text{ THF/día}$$

$$\therefore (5) = 7,51 \text{ m}^3/\text{día}$$

Etilenglicol en los productos de destilación:

$$0,022 \cdot (14) + 0,956 \cdot (15) = z_{EG} \cdot (5)$$

Si:

$$(5) = (14) + (15)$$

Entonces:

$$0,022 \cdot [(5) - (15)] + 0,956 \cdot (15) = z_{EG} \cdot (5)$$

$$0,022 \cdot [7,51 - (15)] + 0,956 \cdot (15) = 5,88$$

$$(15) = 6,12 \text{ m}^3$$

Tetrahidrofurano en los productos de destilación:

$$0,978 \cdot (14) + 0,044 \cdot (15) = z_{THF} \cdot (5)$$

Entonces:

$$0,978 \cdot (14) + 0,044 \cdot [(5) - (14)] = z_{THF} \cdot (5)$$

$$0,978 \cdot (14) + 0,044 \cdot [7,51 - (14)] = 1,63$$

$$(14) = 1,39 \text{ m}^3$$

La composición de la corriente (14) en volumen, de acuerdo a la pureza del destilado es:

$$(14) \rightarrow \begin{array}{l} 97,8 \% \text{ THF} \rightarrow 1,36 \text{ m}^3 = 1\,194,97 \text{ kg THF/día} \\ 2,2 \% \text{ EG} \rightarrow 0,03 \text{ m}^3 = 33,31 \text{ kg EG/día} \end{array}$$

$$(14) = 1\,228,28 \text{ kg/día}$$

La composición de la corriente (15) en volumen, de acuerdo a la pureza del residuo es:

$$(15) \rightarrow \begin{array}{l} 4,4 \% \text{ THF} \rightarrow 0,27 \text{ m}^3 = 237,10 \text{ kg THF/día} \\ 95,6 \% \text{ EG} \rightarrow 5,85 \text{ m}^3 = 6\,514,21 \text{ kg EG/día} \end{array}$$

$$(15) = 6\,751,31 \text{ kg/día}$$

Continuando con el balance de etilenglicol para determinar las líneas (16) y (17). Al considerar que las pérdidas de material son despreciables, el precipitante presente en la corriente (10) será igual al contenido de etilenglicol en la línea (11) en la solución alcohol – EG.

$$EG \text{ en } (10) = p_{EG} \cdot (11)$$

$$p_{EG} \cdot (11) = 286,85 \text{ kg EG/día} \rightarrow 8,31 \% \text{ de } (11)$$

$$p_{alcohol} \cdot (11) = 3\,450,92 - 286,85 = 3\,164,07 \text{ kg alcohol/día} \rightarrow 91,69 \% \text{ de } (11)$$

$$p_{EG} \cdot (11) = 286,85 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{m}^3}{1\,113,81 \text{ kg}} = 0,258 \text{ m}^3 \text{ EG/día}$$

Con relación a la pureza de los productos de destilación de la solución alcohol – EG, solo la corriente (17) contiene etilenglicol porque la corriente (16) es netamente isopropanol.

Etilenglicol en los productos de destilación:

$$q_{EG} \cdot (17) = p_{EG} \cdot (11)$$

$$0,714 \cdot (17) = p_{EG} \cdot (11)$$

$$(17) = \frac{0,714}{0,26} = 0,361 \text{ m}^3/\text{día}$$

Isopropanol en los productos de destilación:

$$q_{alcohol} \cdot (17) = 0,286 \cdot (17) = 0,103 \text{ m}^3 \text{ alcohol/día}$$

$$q_{alcohol} \cdot (17) = 0,10 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{786,06 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 80,96 \text{ kg alcohol/día}$$

La composición de la corriente (17) en volumen, de acuerdo a la pureza del residuo es:

$$(17) \rightarrow \begin{array}{ll} 28,6 \% \text{ alcohol} & \rightarrow 0,103 \text{ m}^3 = 80,96 \text{ kg alcohol/día} \\ 71,4 \% \text{ EG} & \rightarrow 0,258 \text{ m}^3 = 286,85 \text{ kg EG/día} \end{array}$$

$$(17) = 367,81 \text{ kg/día}$$

Si:

$$(11) = (16) + (17)$$

$$(16) \rightarrow 100 \% \text{ alcohol} = 3\,450,92 - 367,81 = 3\,083,11 \text{ kg alcohol/día}$$

A partir de la información de las corrientes de los productos de las dos destilaciones se puede conocer el rendimiento de estas operaciones en base a la cantidad de solvente, agente precipitante y reactivo de lavado recuperado.

Si de la destilación de la solución filtrada se recuperó tetrahidrofurano con una pureza del 97,8 %, entonces:

$$\eta_{THF} = \frac{\text{solvente en el destilado}}{\text{solvente que ingresa a la destilación}} \times 100$$

$$\eta_{THF} = \frac{1\ 194,97}{1\ 432,07} \times 100 = 83,44 \%$$

Si de la destilación de la solución filtrada se recuperó etilenglicol con una pureza del 95,6 %, entonces:

$$\eta_{EG} = \frac{\text{precipitante en el residuo}}{\text{precipitante que ingresa a la destilación}} \times 100$$

$$\eta_{EG} = \frac{6\ 514,21}{6\ 547,52} \times 100 = 99,49 \%$$

En la segunda destilación, no se considera el rendimiento del etilenglicol porque necesita destilarse más tiempo el residuo para obtener mayor pureza; en cambio con respecto al destilado que es isopropanol puro el rendimiento es:

$$\eta_{alcohol} = \frac{\text{reactivo de lavado en el destilado}}{\text{reactivo de lavado que ingresa a la destilación}} \times 100$$

$$\eta_{alcohol} = \frac{3\ 083,11}{3\ 164,07} \times 100 = 97,44 \%$$