ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE MEZCLADO DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS A ESCALA PILOTO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

MIGUEL ANDRÉS PAZMIÑO MÁRQUEZ
miguel.pazmino.m@gmail.com

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

Quito, julio 2013

© Escuela Politécnica Nacional (2013)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Miguel Andrés Pazmiño Márquez, 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.

_____

Miguel Andrés Pazmiño Márquez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Miguel Andrés Pazmiño Márquez, bajo mi supervisión.

_____

Ing. Francisco Quiroz
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PIS-2010-016: Estudio de mezclas binarias de polímeros mediante calorimetría diferencial de barrido DSC, que se ejecutó en el Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología (DECAB).

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mi Madre Dolorosa por estar siempre en todo mi camino.

A mis padres por hacerme lo que soy, apoyarme y enseñarme las cosas más valiosas de la vida. A mi hermana por ser mi ejemplo a seguir.

Al Ing. Francisco Quiroz por siempre solventar mis dudas y ser un gran maestro y amigo.

Al Ing. Miguel Aldás por siempre brindarme su apoyo y conocimientos durante este proyecto.

Al Ing. Guido Ramos por su colaboración, consejos y tiempo que dedicó a este trabajo.

A Iván, Liz, Doc, Gaby, Omar e Hilda por su ayuda, su gran amistad y por compartir todos sus conocimientos conmigo.

A mis tíos Roberto y Maguita por brindarme todo sus apoyo durante mi vida estudiantil.

A Mabe por su apoyo incondicional en todos los ámbitos de mi vida, por su gran amor, comprensión y por todos los momentos compartidos.

A mis amigos de la comunidad Andrés, Kary, Don Dany, Diego, Hernán, Dario por tantos momentos compartidos, por el apoyo incondicional que siempre recibí de su parte y de manera especial a Chula por ser como una hermana para mí. A Tracks, Eli, Gaby, Xime, Paco por todo lo vivido en estos años en la universidad. A mi amigo y gran hermano Alejo por esa amistad que formamos desde niños, por la música y por tantas anécdotas vividas.

A toda mi familia que de alguna u otra forma siempre me apoyaron durante toda mi vida.

DEDICATORIA

Cómo no dedicar este trabajo a las personas que han sido y serán mi fortaleza, mi apoyo y mi determinación para cumplir con mis objetivos en la vida: a mis padres y hermana.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	**xxv**
INTRODUCCIÓN	**xxvii**
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	**1**
1.1. Mezclas de Poliolefinas	1
1.1.1. Polietileno	1
1.1.1.1. Polietileno de alta densidad (PEAD)	3
1.1.1.2. Polietileno de baja densidad (PEBD)	4
1.1.1.3. Polietileno lineal de baja densidad (PELBD)	5
1.1.2. Polipropileno (PP)	6
1.1.2.1. Polipropileno isotáctico (iPP)	8
1.1.2.2. Polipropileno sindiotáctico (sPP)	11
1.1.2.3. Polipropileno atáctico (aPP)	11
1.1.3. Termodinámica de mezclas	11
1.1.3.1. Miscibilidad	12
1.1.3.2. Temperatura de transición vítrea (T_g)	15
1.1.4. Tipos de mezclado	17
1.1.4.1. Dispersivo	17
1.1.4.2. Distributivo	18
1.2. Métodos de análisis para mezclas de polímeros	19
1.2.1. Calorimetría diferencial de barrido DSC	19
1.2.1.1. Introducción	19
1.2.1.2. Velocidad de calentamiento	21
1.2.1.3. Masa de la muestra	22
1.2.1.4. Gas de purga	24
1.2.1.5. Línea base	24
1.2.1.6. Temperatura y entalpía de fusión	25
1.2.1.7. Temperatura de transición vítrea	27
1.2.1.8. Temperatura de cristalización	28
1.2.1.9. Aplicación de la calorimetría diferencial de barrido a las mezclas de poliolefinas	29
1.2.2. Espectroscopía infrarroja (FTIR)	31
1.2.2.1. Introducción	31
1.2.2.2. Movimientos moleculares	31
1.2.2.3. Identificación de poliolefinas	32
1.3. Reciclaje de poliolefinas	34
1.3.1. Introducción	34
1.3.2. Inconvenientes en el tratamiento de residuos plásticos	35
1.3.3. Procesamiento de plástico reciclado	37

2. MATERIALES Y MÉTODOS 40

2.1. Caracterización de materias primas 40
2.1.1. Poliolefinas comerciales 40
2.1.2. Contenido de cenizas 40
2.1.3. Determinación de la densidad 41
2.1.4. Análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido (DSC) 41
2.1.4.1. Calibración y validación 42
2.1.4.2. Determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión 43
2.1.4.3. Determinación de la temperatura de transición vítrea 43
2.1.5. Análsis por espectroscopía infrarroja 44

2.2. Evaluación de la miscibilidad de mezclas de poliolefinas 45
2.2.1. Elaboración de mezclas 45
2.2.2. Evaluación de la dispersión y distribución 46
2.2.3. Análisis térmico de las mezclas por DSC 49
2.2.3.1. Determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión 49
2.2.3.2. Determinación de la temperatura de transición vítrea 50

2.3. Aplicación de las mejores condiciones definidas para la mezcla de poliolefinas comerciales a materiales reciclados seleccionados 51
2.3.1. Poliolefinas recicladas 51
2.3.2. Contenido de cenizas y determinación de la densidad 52
2.3.3. Análisis por espectroscopía infrarroja 52
2.3.4. Elaboración de la mezcla con poliolefinas recicladas y evaluación de la dispersión y distribución 52
2.3.5. Determinación de la densidad del fundido 52
2.3.6. Análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido 53

2.4. Diseño de la planta piloto de mezclado con poliolefinas comerciales y recicladas 54
2.4.1. Ingeniería conceptual 54
2.4.1.1. Capacidad 54
2.4.1.2. Localización de la planta 54
2.4.2. Ingeniería básica 55
2.4.2.1. Balances de masa, energía y elaboración de los diagramas de proceso 55
2.4.2.2. Consideraciones de selección y dimensionamiento de equipos 56
2.4.2.3. Elaboración del lay out 57

2.5. Evaluación económica preliminar de la planta diseñada 58
2.5.1. Costo de materia prima 58
2.5.2. Costos de equipos y servicios auxiliares 58
2.5.3. Estimación del costo de producción por unidad 59

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 60

3.1. Ensayos a poliolefinas comerciales 60
3.1.1. Contenido de cenizas 60
3.1.2. Determinación de la densidad 61
3.1.3. Análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido (DSC) 63
3.1.3.1. Calibración y validación 63
3.1.3.2. Determinación de la temperatura y entalpía de fusión 66
3.1.3.3. Determinación de la temperatura de cristalización 74
3.1.3.4. Determinación de la temperatura de transición vítrea 81
3.1.4. Análsis de los espectros de los polietilenos lineales de baja densidad 87

3.2. Evaluación de la miscibilidad de las mezclas elaboradas 89
3.2.1. Análisis de reogramas 89
3.2.1.1. Selección de polietilenos 89
3.2.1.2. Sistema PEBD Hanwha/PELBD Braskem 92
3.2.1.3. Sistema PEAD/PP 94
3.2.2. Evaluación de la dispersión y distribución 95
3.2.3. Análisis por dsc de las mezclas 101
3.2.3.1. Selección de polietilenos 101
3.2.3.2. Sistema PEBD Hanwha/PELBD Braskem 107
3.2.3.3. Sistema PEAD/PP 119
3.2.3.4. Determinación de la miscibilidad de los sistemas PEAD/PP y PEBD/PELBD a través de la temperatura de transición vítrea 131

3.3. Aplicación de las condiciones definidas para la mezcla de poliolefinas comerciales a materiales reciclados 142
3.3.1. Determinación del contenido de cenizas y densidad 142
3.3.2. Análisis de los espectros 143
3.3.3. Evaluación de la dispersión y distribución 146
3.3.4. Densidad del estado fundido de la mezcla reciclada 147
3.3.5. Análisis térmico de las poliolefinas y de la mezcla recicladas 148

3.4. Diseño de la planta piloto de mezclado con poliolefinas comerciales y recicladas 151
3.4.1. Capacidad de la planta 151
3.4.2. Ubicación de la planta 152
3.4.3. Descripción del proceso 152
3.4.4. Balances de masa, energía y elaboración de los diagramas del proceso 153
3.4.4.1. Balance de masa 153
3.4.4.2. Balance de energía 154
3.4.4.3. Diagramas del proceso 157
3.4.5. Selección y dimensionamiento de equipos 161
3.4.5.1. Extrusor 161
3.4.5.2. Bandeja de enfriamiento 163
3.4.5.3. Soplador 164

3.4.5.4. Equipos en general 165
3.4.6. Lay out 166

3.5. Evaluación económica preliminar de la planta de mezclado diseñada 168
3.5.1. Costos de la materia prima 168
3.5.2. Costos de equipos y servicios auxiliares 168
3.5.3. Estimación del costo de producción por unidad 169

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 171

4.1. Conclusiones 171

4.2. Recomendaciones 174

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 175

ANEXOS 181

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1.1.	Bandas características de absorción en la región del infrarrojo del polietileno y polipropileno	32
Tabla 2.1.	Poliolefinas usadas en el estudio	40
Tabla 2.2	Pureza de los estándares usados en la calibración del calorímetro DSC F1 204 Phoenix	42
Tabla 3.1.	Contenido de material inorgánico en las poliolefinas comerciales obtenido con base en la norma ASTM 5630-06	60
Tabla 3.2.	Rangos referenciales de estabilizantes para poliolefinas comerciales	61
Tabla 3.3.	Densidades experimentales de las poliolefinas comerciales obtenidas con base en la norma ASTM D 792-08 con alcohol etílico absoluto como líquido de inmersión	62
Tabla 3.4.	Rango bibliográfico de densidades de poliolefinas	62
Tabla 3.5.	Determinación del error entre temperatura calculada y teórica	65
Tabla 3.6.	Determinación del error entre la entalpía de fusión calculada y teórica	65
Tabla 3.7.	Rangos de temperatura de fusión para las poliolefinas	66
Tabla 3.8.	Valores resumidos correspondientes a la temperatura y entalpía de fusión de las poliolefinas vírgenes obtenidas a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min	73
Tabla 3.9.	Valores resumidos correspondientes a la temperatura de cristalización de las poliolefinas vírgenes obtenidas a una velocidad de enfriamiento de 10 °C/min	81
Tabla 3.10.	Rangos de temperatura de transición vítrea para poliolefinas	82
Tabla 3.11.	Valores correspondientes a la temperatura de transición vítrea experimental de las poliolefinas vírgenes obtenidas a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min	87
Tabla 3.12.	Bandas características de los comonómeros 1-buteno, 1-hexeno y 1-octeno	88
Tabla 3.13.	Valores cuantitativos de la distribución y dispersión de mezclas entre poliolefinas	95

Tabla 3.14. Valores de las transiciones térmicas determinadas para el sistema PEBD/PELBD a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min 114

Tabla 3.15. Valores de las transiciones térmicas del sistema PEAD/PP obtenidos a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min 126

Tabla 3.16. Valores resumidos de la temperatura de transición vítrea para el sistema PEAD/PP obtenidos a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min 140

Tabla 3.17. Valores resumidos de la temperatura de transición vítrea para el sistema PEBD/PELBD obtenidos a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min 140

Tabla 3.18. Contenido de material inorgánico en las poliolefinas recicladas obtenido con base en la norma ASTM 5630-06 142

Tabla 3.19. Densidades experimentales de las poliolefinas comerciales obtenidas con base en la norma ASTM D 792-08 con alcohol etílico absoluto como líquido de inmersión 143

Tabla 3.20. Densidad del estado fundido de la mezcla PEAD/PP 95/5 obtenida a 210 °C y con una carga de 2,16 kN 147

Tabla 3.21. Valores resumidos de las transiciones térmicas de las poliolefinas recicladas. Las transiciones de primer y segundo orden se determinaron a una velocidad de calentamiento de 10 y 20 °C/min respectivamente 151

Tabla 3.22. Flujos másicos del PEAD, PP y de la mezcla con materiales comerciales y reciclados 153

Tabla 3.23. Temperaturas de entrada y salida al extrusor de las poliolefinas y de las mezclas elaboradas 154

Tabla 3.24. Datos usados en el balance de energía entre el agua refrigerada y la mezcla comercial y reciclada 155

Tabla 3.25. Datos usados en el balance de energía para la determinación del coeficiente de convección del aire suministrado por el soplador 156

Tabla 3.26. Números adimensionales Nusselt y Reynolds calculados para la determinación del caudal de aire necesario para el secado de las mezclas de poliolefinas 157

Tabla 3.27. Parámetros de extrusión para el procesamiento de la mezcla reciclada y comercial 161

Tabla 3.28. Características geométricas del husillo por zonas 162

Tabla 3.29.	Dimensiones de la bandeja de enfriamiento	163
Tabla 3.30.	Precios referenciales de las poliolefinas comerciales y recicladas	168
Tabla 3.31.	Precios de los equipos requeridos para la planta de mezcla de poliolefinas comerciales y recicladas a escala piloto	169
Tabla 3.32.	Costos de consumo de agua y energía eléctrica	169
Tabla 3.33.	Salario de los trabajadores de la planta	170
Tabla 3.34.	Costo de producción por unidad de mezcla elaborada	170
Tabla A II.1.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEAD	191
Tabla A II.2.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEBD Dow	191
Tabla A II.3.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEBD Hanwha	191
Tabla A II.4.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEBD Lotrene	191
Tabla A II.5.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PELBD Braskem	191
Tabla A II.6.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PELBD Dowlex	192
Tabla A II.7.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PELBD Taisox	192
Tabla A II.8.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PP	192
Tabla A II.9.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEAD reciclado	192
Tabla A II.10.	Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PP reciclado	192
Tabla A III.1.	Valores para la determinación de la densidad del PEAD a 19 °C y con densidad del etanol de 0,7902 g/cm^3	193
Tabla A III.2.	Valores para la determinación de la densidad del PEBD Dow a 18,5 °C y con densidad del etanol de 0,79062 g/cm^3	194
Tabla A III.3.	Valores para la determinación de la densidad del PEBD Hanwha 18 °C y con densidad del etanol de 0,79105 g/cm^3	194

Tabla A III.4.	Valores para la determinación de la densidad del PEBD Lotrene 18,5 °C y con densidad del etanol de 0,79062 g/cm^3	194
Tabla A III.5.	Valores para la determinación de la densidad del PELBD Braskem a 18 °C y con densidad del etanol de 0,79105 g/cm^3	194
Tabla A III.6.	Valores para la determinación de la densidad del PELBD Dowlex a 18 °C y con densidad del etanol de 0,79105 g/cm^3	195
Tabla A III.7.	Valores para la determinación de la densidad del PELBD Taisox a 19 °C y con densidad del etanol de 0,7902 g/cm^3	195
Tabla A III.8.	Valores para la determinación de la densidad del PP a 19 °C y con densidad del etanol de 0,7902 g/cm^3	195
Tabla A III.9.	Valores para la determinación de la densidad del PP reciclado a 21 °C y con densidad del etanol de 0,78849 g/cm^3	195
Tabla A III.10.	Valores para la determinación de la densidad del PEAD reciclado a 21 °C y con densidad del etanol de 0,78849 g/cm^3	196
Tabla A IV.1.	Valores de las densidad del etanol con respecto a la temperatura en g/cm^3	197
Tabla A V.1.	Pasos efectuados en el DSC Netzsch 204 F1 Phoenix para cada estándar a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min	198
Tabla A V.2.	Valores de temperatura inicial de los estándares correspondientes al segundo y tercer calentamiento a 10 °C/min	201
Tabla A V.3.	Diferencia máxima permitida entre “Temp. nom.” y “Temp. corr.”	202
Tabla A V.4.	Áreas de los picos de fusión de los estándares correspondientes al segundo y tercer calentamiento a 10 °C/min	203
Tabla A V.5	Desviación permitida entre sensibilidad calculada y experimental	204
Tabla A V.6.	Temperatura inicial del Hg, In y Sn	206
Tabla A V.7.	Temperatura de fusión del Hg, In y Sn	206
Tabla A V.8.	Entalpía de fusión del Hg, In y Sn	206
Tabla A VI.1.	Masas de los componentes individuales para la selección de polietilenos en el sistema PEBD/PELBD. Las masas corresponden a la mezcla PEBD Hanwha con tres PELBD Braskem, Dowlex y Taisox al 5% w/w	208

Tabla A VI.2. Masas de los componentes individuales para la selección de polietilenos en el sistema PEBD/PELBD. Las masas corresponden a la mezcla PEBD Dow con tres PELBD Braskem, Dowlex y Taisox al 5% w/w 208

Tabla A VI.3. Masas de los componentes individuales para la selección de polietilenos en el sistema PEBD/PELBD. Las masas corresponden a la mezcla PEBD Lotrene con tres PELBD Braskem, Dowlex y Taisox al 5% w/w 209

Tabla A VI.4. Masas de los componentes individuales para el sistema PEBD/PELBD. Estos datos corresponden a las concentraciones preliminares 209

Tabla A VI.5. Masas de los componentes individuales para el sistema PEBD/PELBD. Estos datos corresponden a las concentraciones definitivas 209

Tabla A VI.6. Masas de los componentes individuales para el sistema PEAD/PP 209

Tabla A VI.7. Masas de los componentes individuales para el sistema PEAD/PP con materiales reciclados 210

Tabla A VII.1. Valores para la determinación de la densidad del fundido de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 211

Tabla A VIII.1. Masas de las poliolefinas vírgenes y de las celdas usadas para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión 212

Tabla A VIII.2. Masas de las poliolefinas vírgenes y de las celdas usadas para la determinación de la temperatura de transición vítrea 212

Tabla A VIII.3. Masas de las mezclas PEAD/PP y PEBD/PELBD y de las celdas usadas en la determinación de la temperatura de transición vítrea 213

Tabla A VIII.4. Masas de las muestras y de las celdas usadas para la selección del sistema PEBD/PELBD. La concentración de todas las mezclas es de 95/5 (%w/w) para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión 213

Tabla A VIII.5. Masas de la mezcla PEAD/PP y de las celdas usadas para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión 214

Tabla A VIII.6. Masas de la mezcla PEBD Hanwha/PELBD Braskem y de las celdas usadas en los ensayos térmicos para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión 214

Tabla A VIII.7. Masas de las poliolefinas y de la mezcla reciclada así como de las celdas usadas en los ensayos térmicos para la determinación de la temperatura transición vítrea y la temperatura y entalpía de fusión 214

Tabla A X.1. Valores para la determinación del porcentaje de agua adherida a la mezcla luego del enfriamiento 221

Tabla A X.2. Valores de prueba y error para la determinación del diámetro del husillo del extrusor 224

Tabla A X.3. Valores mínimos, medios y máximos de longitud por zona del husillo para la determinación de su longitud máxima 225

Tabla A X.4. Valores mínimos y máximos de las alturas de los filetes por zona del husillo 225

Tabla A XI.1. Hoja de especificación del dosificador de tornillo 229

Tabla A XI.2. Hoja de especificación del extrusor monohusillo 230

Tabla A XI.3. Hoja de especificación de la bandeja de enfriamiento 230

Tabla A XI.4. Hoja de especificación del enfriador Chiller 231

Tabla A XI.5. Hoja de especificación del soplador de aire 231

Tabla A XI.6. Hoja de especificación de la pelletizadora de cuchillas 232

Tabla A XI.7. Hoja de especificación del vibrador 232

Tabla A XI.8. Hoja de especificación de la máquina de llenado 233

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Estructura química de un polietileno	1
Figura 1.2.	Vista ortogonal de la estructura de un cristal de polietileno con sus respectivas dimensiones	2
Figura 1.3.	Esferulita de polietileno con bandas angulares	3
Figura 1.4.	Representación esquemática de las cadenas y ramificaciones de un polietileno de alta densidad	3
Figura 1.5.	Representación esquemática de las cadenas y ramificaciones de un polietileno de baja densidad	4
Figura 1.6.	Representación esquemática de las cadenas y ramificaciones de un polietileno lineal de baja densidad	6
Figura 1.7.	Esquema de las configuraciones estereoquímicas del polipropileno: a) isotáctico, b) siondiotáctico, c) atáctico. Los círculos de color negro representan la cadena principal mientras que los de color blanco corresponden a los grupos metilo	7
Figura 1.8.	Conformación helicoidal de la estructura α del iPP	8
Figura 1.9.	Microestructura del α-iPP con direcciones de crecimiento de las cadenas primarias y tangenciales	9
Figura 1.10.	Agrupación paralela de las lamelas en el β-iPP	9
Figura 1.11.	Esquema de la estructura de las cadenas en el γ-iPP, las mismas que forman 80° entre ellas y 40° con respecto a la superficie de la lamela. Las barras de color blanco representan a las cadenas con la misma quiralidad mientras que las de color negro representan a las cadenas con quiralidad opuesta	10
Figura 1.12.	Diagrama general de fases de una mezcla polimérica. La zona intermedia del gráfico corresponde a la región de una sola fase o de miscibilidad. Las zonas comprendidas dentro de las curvas pertenecen a las regiones donde se da separación de fases o inmiscibilidad	14

Figura 1.13. Efecto del peso molecular y del plastificante sobre la temperatura de transición vítrea. A mayor peso molecular mayor T_g y a mayor cantidad de plastificante menor T_g 16

Figura 1.14. Reducción de tamaño de partícula en la mezcla por la cohesión 17

Figura 1.15. Homogenización de las partículas por la aplicación de esfuerzos 18

Figura 1.16. a) Mala dispersión y distribución. b) Buena distribución y mala dispersión. c) Buena dispersión y mala distribución. d) Buena distribución y dispersión 19

Figura 1.17. Esquema de las transiciones térmicas de un polímero que pueden identificarse con el desplazamiento de la línea base hacia procesos exotérmicos o endotérmicos 20

Figura 1.18. (a) Calorímetro con flujo de calor donde la muestra y la referencia se ubican en el mismo horno con una sola fuente de calentamiento. (b) Calorímetro energía- compensación con calentamiento y horno individual para muestra y referencia 21

Figura 1.19. Influencia de la velocidad de calentamiento en la fusión de un material polimérico a (I) 10 °C/min, (II) 20 °C/min, (III) 40 °C/min 22

Figura 1.20. Efecto de la cantidad de muestra de un polipropileno en la sensibilidad del termograma 23

Figura 1.21. Línea base tipo recta y curva seleccionadas de acuerdo a la transición térmica 25

Figura 1.22. Determinación de la temperatura y entalpía de fusión de un polímero durante el calentamiento a través de las tangentes y extrapolación de la línea base 26

Figura 1.23. Determinación de la temperatura de transición vítrea con extrapolación de la línea base y bisectriz de la transición trazada por su punto medio 28

Figura 1.24. Determinación de la temperatura de cristalización de un polímero durante el enfriamiento a través de las tangentes y extrapolación de la línea base 29

Figura 1.25. Termogramas correspondientes al primer y segundo calentamiento (curva superior e inferior respectivamente) de una mezcla PEAD-PP con 6,260 mg de muestra a 20 °C/min con dos picos de fusión pertenecientes a los materiales puros. Las áreas indican que esta mezcla tiene una proporción de 80% de PEAD y 20% de PP 30

Figura 1.26. Vibraciones características del metileno a) simétrica, b) antisimétrica, c) en un plano, d) opuesta, e) giratoria, f) reversa 32

Figura 1.27. Espectro de un sistema polipropileno homopolímero y polietileno de alta densidad a distintas concentraciones entre 1432 y 1300 cm^{-1}. Se observan dos bandas a 1376 y 1368 cm^{-1} por la cantidad de grupos metilo y metileno 33

Figura 1.28. Crecimiento de la producción mundial de plástico desde 1950 hasta 2011 34

Figura 1.29. Importación de poliolefinas del Ecuador entre los años 2010 y 2011 36

Figura 1.30. Códigos de reciclaje SPI para materiales plásticos 38

Figura 2.1. Esquema de las mezclas elaboradas a diferentes concentraciones en peso 46

Figura 2.2. Moldes tipo flash con sus respectivas dimensiones (mm) usados para la elaboración de probetas 47

Figura 2.3. Estándares para evaluación de dispersión y distribución de mezclas de poliolefinas: a) mala dispersión y distribución, b) buena dispersión, mala distribución, c) mala dispersión, buena distribución y d) buena dispersión y distribución 48

Figura 2.4. Poliolefinas recicladas usadas en la investigación 51

Figura 3.1. Curva de calibración para temperatura del DSC Netzsch F1 204 Phoenix para un rango de trabajo entre -200 y 700 °C con 20 ml/min de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min 64

Figura 3.2. Curva de calibración para entalpía del DSC Netzsch F1 204 Phoenix para un rango de trabajo entre -200 y 300°C con 20 ml/min de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min 64

Figura 3.3. Termograma de las tres repeticiones del PEAD correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 67

Figura 3.4. Termograma de las tres repeticiones del PEBD Dow correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 68

Figura 3.5. Termograma de las tres repeticiones del PEBD Hanwha correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 69

Figura 3.6. Termograma de las tres repeticiones del PEBD Lotrene correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 70

Figura 3.7. Termograma de las tres repeticiones del PELBD Braskem correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 70

Figura 3.8. Termograma de las tres repeticiones del PELBD Dowlex correspondientes al segundo calentamiento a 10°C/min 71

Figura 3.9. Termograma de las tres repeticiones del PELBD Taisox correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 72

Figura 3.10. Termograma de las tres repeticiones del PP correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 73

Figura 3.11. Termograma del PEAD correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 75

Figura 3.12. Termograma del PEBD Dow correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 76

Figura 3.13. Termograma del PEBD Hanwha correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 77

Figura 3.14. Termograma del PEBD Lotrene correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 77

Figura 3.15. Termograma del PELBD Braskem correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 78

Figura 3.16. Termograma del PELBD Dowlex correspondientes al primer enfriamiento a 10°C/min 79

Figura 3.17. Termograma del PELBD Taisox correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 80

Figura 3.18. Termograma del PP correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min 80

Figura 3.19. Termograma del PEAD correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo 83

Figura 3.20. Termograma del PEBD Hanwha correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo 84

Figura 3.21. Termograma del PELBD Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo 84

Figura 3.22. Termograma de la primera repetición del PP correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con intracooler como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo 85

Figura 3.23. Termograma de la segunda repetición del PP correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con intracooler como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo 86

Figura 3.24. Termograma de la tercera repetición del PP correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con intracooler como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo 86

Figura 3.25. Espectro de los polietilenos lineales de baja densidad Braskem, Dowlex y Taisox en el rango entre 981 y 735 cm^{-1} 88

Figura 3.26. Reograma de las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox obtenido a 40 rpm y a 180 °C. Todas las mezclas tienen una concentración de 5% de PELBD 90

Figura 3.27. Reograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox obtenido a 40 rpm y a 180 °C. Todas las mezclas tienen una concentración de 5% de PELBD 91

Figura 3.28. Reograma de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox obtenido a 40 rpm y a 180 °C. Todas las mezclas tienen una concentración de 5% de PELBD 91

Figura 3.29. Reograma del sistema PEBD Hanwha-PELBD Braskem con concentraciones preliminares obtenido a 40 rpm y a 180 °C 92

Figura 3.30. Reograma del sistema PEBD Hanwha-PELBD Braskem definitivo obtenido a 40 rpm y a 180 °C 93

Figura 3.31. Reograma del sistema PEAD/PP obtenido a 40 rpm y a 180 °C 94

Figura 3.32. Probetas de las mezclas entre el PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox 95/5 obtenidas a 200 °C y 4 000 psi 96

Figura 3.33. Probetas de las mezclas entre el PEBD Dow con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox 95/5 obtenidas a 200 °C y 4 000 psi 97

Figura 3.34. Probetas de las mezclas entre el PEBD Lotrene con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox 95/5 obtenidas a 200 °C y 4 000 psi 98

Figura 3.35. Probetas de las mezclas definitivas entre el PEBD Hanwha y PELBD Braskem obtenidas a 200 °C y 4 000 psi 99

Figura 3.36. Probetas de las mezclas PEAD/PP obtenidas a 210 °C y 4 000 psi 100

Figura 3.37. Termograma de las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 101

Figura 3.38. Termograma de las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento a 10°C/min 102

Figura 3.39. Termograma de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 103

Figura 3.40. Termograma de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 104

Figura 3.41. Termograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 105

Figura 3.42. Termograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 106

Figura 3.43. Termograma de las mezclas PEBD Dow, Hanwha y Lotrene con el PELBD Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 107

Figura 3.44. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 108

Figura 3.45. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 109

Figura 3.46. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 110

Figura 3.47. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 110

Figura 3.48. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 111

Figura 3.49. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 112

Figura 3.50. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 113

Figura 3.51. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 114

Figura 3.52. Comparación de los termogramas del sistema PEBD/PELBD y de sus componentes puros correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 115

Figura 3.53. Comparación de los termogramas del sistema PEBD/PELBD y de sus componentes puros correspondientes al primer calentamiento a 10 °C/min 116

Figura 3.54. Variación de la temperatura de fusión del PEBD en la mezcla con respecto al porcentaje de PELBD 117

Figura 3.55. Variación de la entalpía de fusión del sistema PEBD/PELBD con respecto al porcentaje de PELBD 117

Figura 3.56. Variación de la temperatura de cristalización del sistema PEBD/PELBD con respecto al porcentaje de PELBD 118

Figura 3.57. Termograma de la mezcla PEAD/PP 95/5 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 119

Figura 3.58. Termograma de la mezcla PEAD/PP 95/5 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 120

Figura 3.59. Termograma de la mezcla PEAD/PP 90/10 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 121

Figura 3.60. Termograma de la mezcla PEAD/PP 90/10 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 122

Figura 3.61. Termograma de la mezcla PEAD/PP 10/90 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 123

Figura 3.62. Termograma de la mezcla PEAD/PP 10/90 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 123

Figura 3.63. Termograma de la mezcla PEAD/PP 5/95 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min 124

Figura 3.64. Termograma de la mezcla PEAD/PP 5/95 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min 125

Figura 3.65. Comparación de los termogramas del sistema PEAD/PP y de sus componentes puros correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min 126

Figura 3.66. Comparación de los termogramas del sistema PEAD/PP correspondientes al primer calentamiento a 10 °C/min 127

Figura 3.67. Variación de la temperatura de fusión del PP con respecto al porcentaje de PEAD 128

Figura 3.68. Variación de la temperatura de fusión del PEAD con respecto su contenido en la mezcla 128

Figura 3.69. Variación de la entalpía de fusión de la mezcla con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones menores a 10% 129

Figura 3.70. Variación de la entalpía de fusión de la mezcla con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones mayores a 90% 130

Figura 3.71. Variación de la temperatura de cristalización de la mezcla con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones menores a 10% 130

Figura 3.72. Variación de la temperatura de cristalización del PP con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones mayores a 90% 131

Figura 3.73. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min 132

Figura 3.74. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 90/10 a 20 °C/min 133

Figura 3.75. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 a 20°C/min. Se muestra la primera transición 134

Figura 3.76. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 a 20 °C/min. Se muestra la segunda transición 135

Figura 3.77. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 5/95 a 20 °C/min 136

Figura 3.78. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 a 20 °C/min 137

Figura 3.79. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 a 20 °C/min 137

Figura 3.80. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 a 20 °C/min 138

Figura 3.81. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 a 20 °C/min 139

Figura 3.82. Variación de la temperatura de transición vítrea de la mezcla PEAD/PP con respecto al porcentaje de PEAD 141

Figura 3.83. Variación de la temperatura de transición vítrea del PEBD y del PELBD con respecto al contenido de PEBD en la mezcla 141

Figura 3.84. Espectro del polipropileno entre 4000 y 450 cm^{-1} 144

Figura 3.85. Espectro ampliado del polipropileno entre 745 y 705 cm^{-1} 144

Figura 3.86. Espectro del PEAD entre 4000 y 450 cm^{-1} 145

Figura 3.87. Espectro del PEAD entre 1400 y 1320 cm^{-1} 145

Figura 3.88. Reograma de las mezclas PEAD/PP 95/5 reciclada y con materiales vírgenes a 180 °C y a 40 rpm 146

Figura 3.89. Probeta de la mezcla reciclada PEAD/PP obtenida a 210 °C y 4 000 psi 147

Figura 3.90. Termograma correspondiente al segundo calentamiento del PEAD reciclado a 10 °C/min 148

Figura 3.91. Termograma correspondiente al segundo calentamiento del PP reciclado a 10 °C/min 149

Figura 3.92. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 a 10 °C/min 150

Figura 3.93. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min 150

Figura 3.94. Diagrama de bloques del proceso para la elaboración de mezclas con poliolefinas comerciales y recicladas 158

Figura 3.95.	Diagrama del flujo del proceso para la elaboración de mezclas con poliolefinas comerciales	159
Figura 3.96.	Diagrama del flujo del proceso para la elaboración de mezclas con poliolefinas recicladas	160
Figura 3.97.	Esquema del husillo del extrusor con el que se estimaron sus parámetros geométricos	162
Figura 3.98.	Esquema en tres dimensiones de la bandeja de enfriamiento seleccionada para el proceso de mezclado. Las unidades se encuentran en mm	163
Figura 3.99.	a) Esquema en tres dimensiones del soplador seleccionado para el proceso de mezclado. b) Diámetros del extruido de la mezcla. c) Dimensiones de las aberturas de salida de aire. Las unidades se encuentran en mm	164
Figura 3.100.	Diagrama de recorrido del producto (mezcla PEAD/PP 95/5)	166
Figura 3.101.	Distribución en planta y elevación para la producción de mezclas de poliolefinas comerciales y recicladas PEAD/PP 95/5	167
Figura A I.1.	Hoja técnica del PEAD	182
Figura A I.2.	Hoja técnica del PEBD Dow	183
Figura A I.3.	Hoja técnica del PEBD Hanwha	184
Figura A I.4.	Hoja técnica del PEBD Lotrene	185
Figura A I.5.	Hoja técnica del PELBD Braskem	186
Figura A I.6.	Hoja técnica del PELBD Dowlex	187
Figura A I.7.	Hoja técnica del PELBD Taisox	188
Figura A I.8.	Hoja técnica del PP	189
Figura A V.1.	Termograma del segundo y tercer calentamiento del Hg obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva	199
Figura A V.2.	Termograma del segundo y tercer calentamiento del In obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva	199
Figura A V.3.	Termograma del segundo y tercer calentamiento del Sn obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva	200

Figura A V.4. Termograma del segundo y tercer calentamiento del Bi obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva 200

Figura A V.5. Termograma del segundo y tercer calentamiento del Zn obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva 201

Figura A V.6 Ventana del programa de calibración para temperatura del software Netzsch Proteus 202

Figura A V.7 Ventana del programa de calibración para entalpía del software Netzsch Proteus 203

Figura A V.8. Termograma de los tres calentamientos del Hg obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio, temperatura y entalpía de fusión 204

Figura A V.9. Termograma de los tres calentamientos del In obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio, temperatura y entalpía de fusión 205

Figura A V.10. Termograma de los tres calentamientos del Sn obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio, temperatura y entalpía de fusión 205

Figura A IX.1. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min 215

Figura A IX.2. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 90/10 a 20 °C/min 216

Figura A IX.3. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 a 20 °C/min 216

Figura A IX.4. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 5/95 a 20 °C/min 217

Figura A IX.5. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 a 20 °C/min 217

Figura A IX.6. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 a 20 °C/min 218

Figura A IX.7. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 a 20 °C/min 218

Figura A IX.8. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 a 20 °C/min 219

Figura A IX.9. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min 219

Figura A X.1. Características geométricas del perfil extruido tipo "tallarín" 222

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. 234

Figura A XII.2. Proforma del enfriador Chiller de la Casa Comercial HAITIAN Plastics Machinery 242

ÍNDICE DE ANEXOS

PÁGINA

ANEXO I
Hojas técnicas de las poliolefinas empleadas en el estudio 182

ANEXO II
Cálculos para la determinación del contenido de cenizas de poliolefinas comerciales y recicladas 190

ANEXO III
Cálculos para la determinación de la densidad de poliolefinas comerciales y recicladas 193

ANEXO IV
Valores de densidad del etanol con respecto a la temperatura 197

ANEXO V
Calibración y validación del calorímetro diferencial de barrido Netzsch DSC F1 204 Phoenix 198

ANEXO VI
Determinación de las masas de las poliolefinas comerciales y recicladas usadas para la elaboración de mezclas 207

ANEXO VII
Determinación de la densidad del fundido de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 211

ANEXO VIII
Masas de las poliolefinas vírgenes, recicladas y de las mezclas usadas en los ensayos térmicos 212

ANEXO IX
Termogramas de la determinación de la miscibilidad de los sistemas PEAD/PP, PEBD/PELBD y de la mezcla reciclada a través de la T_g 215

ANEXO X
Cálculos para el diseño de la planta de mezclado de poliolefinas comerciales y recicladas 220

ANEXO XI
Hojas de especificación de los equipos seleccionados para la planta de mezclado 229

ANEXO XII
Proformas de la línea de extrusión 234

ANEXO XIII
Cálculos del análisis económico preliminar 243

RESUMEN

El presente estudio tuvo como propósito la determinación de la miscibilidad de los sistemas de poliolefinas PEAD/PP y PEBD/PELBD a través del criterio de la temperatura de transición vítrea para luego diseñar, de manera preliminar, una planta a escala piloto que procese la mezcla con mejores condiciones de miscibilidad con poliolefinas comerciales y recicladas.

Se efectuó la caracterización de las poliolefinas comerciales y se determinó que el contenido de material inorgánico pudo afectar la formación de sus cristales con nucleaciones heterogéneas. Por otra parte, de acuerdo a los ensayos térmicos, se determinó que los PEBD y PELBD no presentaron estabilidad de la línea base antes del proceso de fusión debido a sus ramificaciones cortas y largas.

Se elaboraron las mezclas de los sistemas de poliolefinas antes mencionados y se encontró que todas ella presentaron una adecuada distribución y dispersión macroscópica.

Se les realizaron ensayos térmicos por DSC y se determinó que sus temperaturas de fusión disminuyeron con respecto a los valores de sus componentes puros en ambos sistemas. En las mezclas PEBD/PELBD se produjeron dos nucleaciones y conforme se incrementó la concentración de PELBD se originó una tercera, mientras que en las mezclas PEAD/PP se produjo una sola nucleación en todas las concentraciones estudiadas.

Además se determinaron las temperaturas de transición vítrea para evaluar la miscibilidad en las mezclas elaboradas. Se encontró que el sistema PEBD/PELBD en todas las concentraciones estudiadas no presentó miscibilidad. Aunque en sus termogramas se observó una sola T_g, con el criterio de la primera derivada, se logró determinar la existencia de dos transiciones vítreas. Por otro lado, en el sistema PEAD/PP sí se encontró miscibilidad a 5, 10 y 95% de PP.

Con base en el análisis de la T_g y de la variación de la capacidad calórica en el termograma se determinó que la mezcla PEAD/PP 95/5 presentó las mejores condiciones de miscibilidad.

Se realizó una mezcla PEAD/PP 95/5 con poliolefinas recicladas y se evaluó su T_g. Se determinó que en materiales reciclados también se produce miscibilidad a partir de las condiciones establecidas para la mezcla con poliolefinas vírgenes.

Se procedió entonces a diseñar una planta a escala piloto que procese 470 kg/día de mezcla PEAD/PP 95/5 con materiales comerciales y reciclados para lo cual se estableció una línea completa de extrusión con las siguientes etapas: alimentación, mezclado, enfriamiento, secado, cortado y empaquetado.

Se determinaron las cantidades de materia prima, agua de enfriamiento y aire para secado a partir de los balances de masa y energía. Además se elaboraron diagramas BFD, PFD y distribución de planta con corte lateral.

Finalmente se realizó un estudio económico preliminar con el que se determinó que el costo de producción por unidad (un saco de 25 kg) de mezcla comercial y reciclada fue de $62,24 y $31,64 respectivamente.

INTRODUCCIÓN

Las mezclas entre polímeros han crecido paulatinamente hasta constituir cerca del 36% del total de consumo de plástico mundial. Las mezclas de poliolefinas forman parte de este grupo y se las empezó a desarrollar debido a que los polímeros sintetizados no satisfacían la creciente demanda de aplicaciones. Entre los principales beneficios de la elaboración de mezclas se pueden citar los siguientes: mejoramiento de propiedades específicas, reducción de costos de elaboración y procesamiento, reciclaje de residuos plásticos en zonas industriales y urbanas, cambios rápidos de formulación de la mezcla en planta, entre otros (Utracki, 2002, p. 13).

Las poliolefinas son los materiales plásticos más usados a nivel mundial, sus excelentes propiedades y bajo costo de producción hacen que estos polímeros sean utilizados en una extensa gama de aplicaciones: de aquí surge su gran importancia comercial, tecnológica y ambiental (Cadena y Quiroz, 2000, p. 1).

Dentro de las poliolefinas se encuentran el polietileno (PE) y polipropileno (PP), que constituyen sus dos materiales más representativos. Estos polímeros pueden ser mezclados en el estado fundido y lograr una adecuada miscibilidad en un rango determinado de concentraciones debido a la similitud de sus cadenas (Choi y White, 2005, p. 115).

Es importante aclarar que la miscibilidad en mezclas de polímeros es un proceso de mayor complejidad comparado con mezclas entre sustancias de bajo peso molecular. Esto se debe a la mínima entropía que se genera al mezclarlos, a sus propiedades reológicas y a su gran tamaño molecular (Calhoun y Peacock, 2006, p. 184).

Debido a la gran producción de poliolefinas, se estima que la elaboración de sus mezclas ha crecido un 6 a 7% anual en las dos últimas décadas, esto refleja su buen desempeño tecnológico, su alta demanda en el mercado y su buena aceptación como reciclaje de residuos plásticos (Utracki, 2002, p. 1024; Kyu y Nwabunma, 2008, p. 3).

Según datos de EMASEO (2010), Quito recicla menos del 8% del plástico confinado en los botaderos. De aquí surge la necesidad del tratamiento de este tipo de residuos sólidos. Encontrar miscibilidad entre mezclas de poliolefinas, especialmente en las recicladas, contribuirá a que estos polímeros ofrezcan mayores posibilidades de reutilización (p. 10).

El diseño de una planta que procese estas mezclas ofrece un mecanismo para disminuir la cantidad de poliolefinas en botaderos y proveer al mercado local con productos plásticos reutilizables y más económicos comparados con un material virgen.

Este proyecto, a través de la determinación de la miscibilidad de sistemas de poliolefinas, brinda una solución factible para el reciclaje y para tratamiento de residuos plásticos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. MEZCLAS DE POLIOLEFINAS

1.1.1. POLIETILENO

El polietileno consiste en una cadena larga de carbonos los cuales se enlazan a un par de hidrógenos. Esta molécula puede contener ramificaciones en varios grados así como pequeñas cantidades de insaturación. En la Figura 1.1 se observa la estructura química de una molécula de polietileno (Peacock, 2000, p. 1).

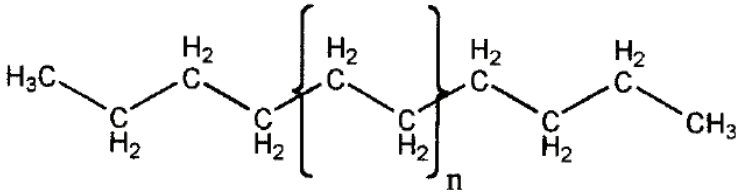


Figura 1.1. Estructura química de un polietileno
(Peacock, 2000, p. 1).

Esta poliolefina es producida a altas presiones y temperaturas o con presencia de catalizadores los mismos que son usados de acuerdo a las propiedades requeridas para el material. Se pueden obtener polietilenos con ramificaciones cortas, largas e incluso lineales conforme el procedimiento usado en la síntesis (Pascu y Vasile, 2005, p. 1).

Se utilizan dos tipos básicos de reacciones: polimerización por radicales libres y la catálisis por coordinación. La primera es usada para la obtención del polietileno de baja densidad y algunos ionómeros del etileno. Con el segundo se producen el polietileno de alta densidad y polietileno lineal de baja densidad (Calhoun y Peacock, 2006, p. 270).

En lo que respecta a su morfología, este polímero es un material semicristalino que generalmente exhibe una estructura ortorrómbica formada por unidades paralelas de metileno (Choi y White, 2005, p. 55).

En la Figura 1.2 se observa la morfología de un polietileno.

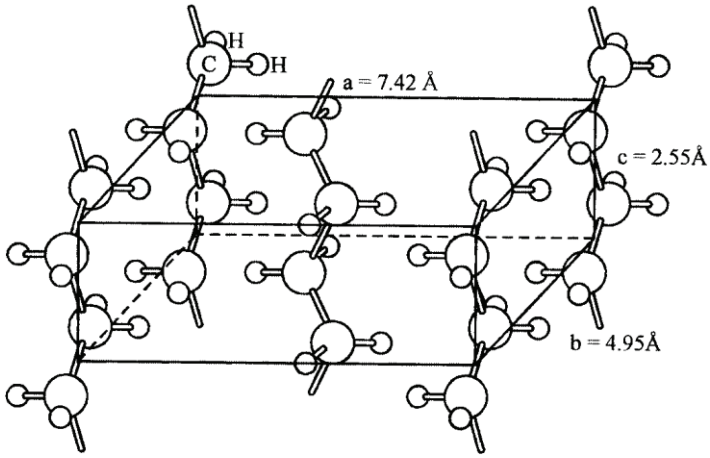


Figura 1.2. Vista ortogonal de la estructura de un cristal de polietileno con sus respectivas dimensiones
(Peacock, 2000, p. 13).

Debido a su orden estructural, esta poliolefina puede presentar elevados niveles de cristalinidad, como en el caso del polietileno de alta densidad donde se forman lamelas cristalinas de 10 a 20 nm de espesor y dimensiones laterales de más de 100 nm. A niveles intermedios de cristalinidad, como es el caso del polietileno de baja densidad y el polietileno lineal de baja densidad, las lamelas poseen un espesor 5 a 10 nm y dimensiones laterales de más de 10 nm. Estas lamelas tienden a alinearse unas con otras y se organizan para formar esferulitas (Calhoun y Peacock, 2006, p. 277). En la Figura 1.3 se aprecia una esferulita de polietileno.

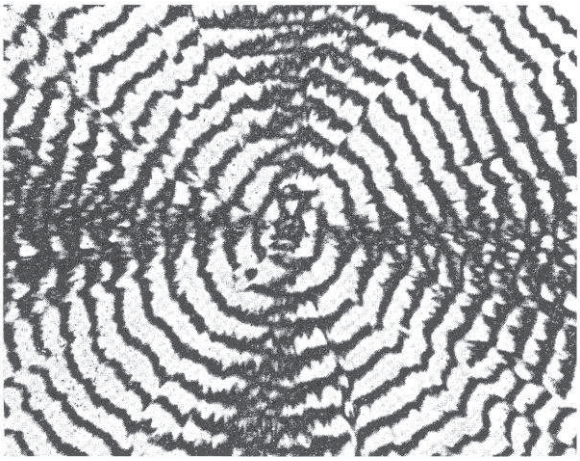


Figura 1.3. Esferulita de polietileno con bandas angulares
(Choi y White, 2005, p. 92)

1.1.1.1. Polietileno de alta densidad (PEAD)

El polietileno de alta densidad posee cadenas lineales de hidrocarburos con escasas ramificaciones en su estructura (Peacock, 2000, p. 2). En la Figura 1.4 se aprecia un esquema del PEAD.

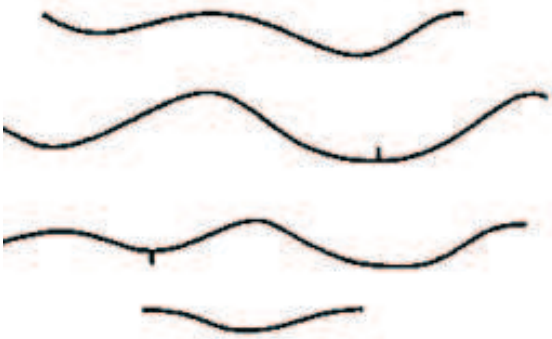


Figura 1.4. Representación esquemática de las cadenas y ramificaciones de un polietileno de alta densidad
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 268)

La linealidad de sus cadenas hacen que este material pueda alcanzar altos niveles de cristalinidad entre 60 y 80%, esto permite que dicha poliolefina tenga la

densidad más alta entre los polietilenos. Debido a sus escasas ramificaciones también se lo suele llamar polietileno lineal (Peacock, 2000, p. 2).

Entre las principales propiedades de este material se encuentran: alta resistencia a la tensión y al impacto, excelente procesabilidad, liviano, escasa absorción de humedad, resistencia química, mantiene sus propiedades a bajas temperaturas, alta cristalinidad, entre otras (Pascu y Vasile, 2005, p. 17).

Las mezclas de este polímero con otros polietilenos generalmente resultan inmiscibles. A pesar de esto, se obtienen algunas mejoras en sus propiedades. Por ejemplo, al mezclarlo con PEBD se consigue un material con alta tensión del fundido y buena procesabilidad; con el PELBD se logra alta rigidez y resistencia al impacto (Kyu y Nwabunma, 2008, p. 65).

1.1.1.2. Polietileno de baja densidad (PEBD)

Este polietileno lleva su nombre debido al contenido substancial de ramificaciones cortas y largas en sus cadenas lo que produce un descenso en su cristalinidad y consecuentemente en su densidad (Peacock, 2000, p. 2). En la Figura 1.5 se muestra la estructura de las cadenas del PEBD.

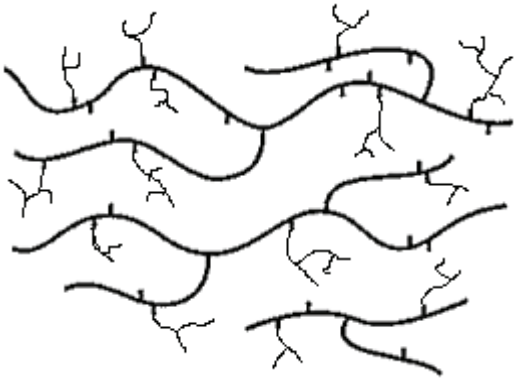


Figura 1.5. Representación esquemática de las cadenas y ramificaciones de un polietileno de baja densidad
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 268)

Las ramificaciones cortas están constituidas principalmente por grupos etilo y butilo que debido al proceso de polimerización con el que se obtiene esta poliolefina, tienden a unirse. Cuando no se da esta agrupación se encuentran separadas por tramos en donde la cadena principal no contiene ramificaciones. El PEBD presenta también ramales largos separados al azar a través de la cadena principal (Calhoun y Peacock, 2006, p. 269; Peacock, 2000, p. 2).

Exhibe algunas propiedades importantes: alta flexibilidad, bajo costo, resistente a solventes orgánicos y a la corrosión, alta resistencia al impacto y excelentes propiedades eléctricas, baja permeabilidad al agua y humedad. Es usado ampliamente en la elaboración de films debido a su transparencia y alta elasticidad (Pascu y Vasile, 2005, p. 15).

El polietileno de baja densidad suele mezclarse con el polietileno lineal de baja densidad para el desarrollo de films usados en la agricultura, alimentos, industria, etc. Esta combinación constituye la mezcla más usada entre polietilenos debido a que se incrementa la tensión del fundido, la procesabilidad y la elasticidad de los films producidos (Pascu y Vasile, 2005, p. 15; Kyu y Nwabunma, 2008, p. 65).

1.1.1.3. Polietileno lineal de baja densidad (PELBD)

Esta poliolefina, a diferencia del PEBD, consiste en cadenas lineales a las cuales se encuentran sujetas solo ramificaciones cortas. Éstas pueden pertenecer a grupos etilo, butilo o hexilo (Peacock, 2000, p. 3). En la Figura 1.6 se muestra un esquema de las cadenas del PELBD.

El PELBD también contiene pequeñas proporciones de ramificaciones largas pero no con la misma complejidad que las encontradas en el PEBD. Este polietileno es polidisperso con respecto a su peso molecular y a la distribución de sus ramificaciones (Calhoun y Peacock, 2006, p. 269; Peacock, 2000, p. 3).

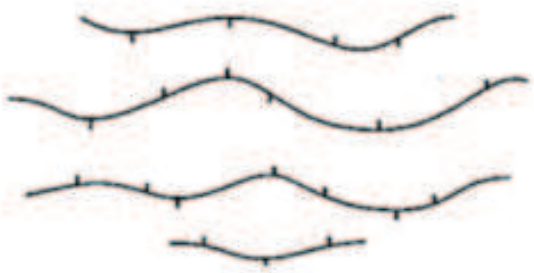


Figura 1.6. Representación esquemática de las cadenas y ramificaciones de un polietileno lineal de baja densidad
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 268)

Este material, en la elaboración de films, muestra una adecuada estabilidad de burbuja, alta resistencia a la tracción y elevada elasticidad. Se lo mezcla con el PEBD para mejorar su procesabilidad y también para la obtención de films. (Pascu y Vasile, 2005, p. 18).

1.1.2. POLIPROPILENO (PP)

El polipropileno es una poliolefina que contiene arreglos esteáricos de grupos metilo a lo largo de la cadena principal. Si todos estos grupos se ubican al mismo lado de la cadena al polímero se lo conoce como PP isotáctico. Por otra parte, si dichos grupos se sitúan alternadamente a lo largo de la cadena al PP se lo denomina sindiotáctico. Por último, si los metilos se encuentran distribuidos al azar, el PP es atáctico (Tripathi, 2002, p. 1).

En la Figura 1.7 se muestran las tres configuraciones del polipropileno.

El grupo metilo colgante en la cadena del polipropileno es de gran importancia ya que define las características de este polímero. La mayoría de las propiedades físicas, como el grado de cristalinidad, peso y distribución molecular, polidispersidad, composición en mezclas y en copolímeros son definidas por su estereoregularidad. También define ciertos parámetros de procesamiento como la

orientación, historia térmica, compatibilidad con aditivos y condiciones a las que se funde el material (Calhoun y Peacock, 2006, p. 285; Moore, 1996, p. 116).

Catalizadores estereoespecíficos o Ziegler-Natta se utilizan para la polimerización de este material. La catálisis con metalocenos también es usada para la producción de una nueva generación de polipropilenos debido a que provee un excelente control en la formación de la molécula con altos grados de isotacticidad y con una estrecha distribución del peso molecular (Tripathi, 2002, p. 2).

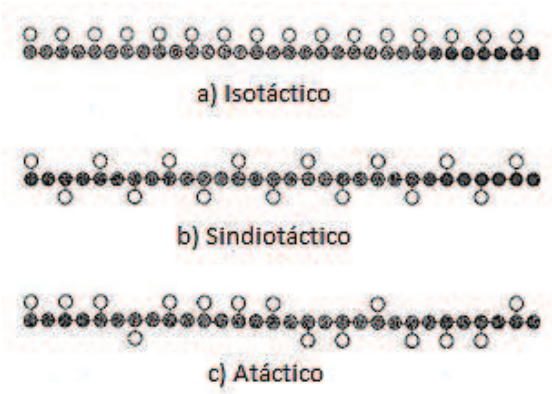


Figura 1.7. Esquema de las configuraciones estereoquímicas del polipropileno: a) isotáctico, b) siondiotáctico, c) atáctico. Los círculos de color negro representan la cadena principal mientras que los de color blanco corresponden a los grupos metilo (Moore, 1996, p. 115)

Esta poliolefina se la combina ya sea con el PEBD o con el PELBD para mejorar sus propiedades mecánicas a bajas temperaturas, su resistencia al impacto y disminuir su temperatura de fragilidad. Si se la mezcla con el PEAD a concentraciones altas y bajas de un componente, se consigue mejorar las propiedades térmicas en especial la temperatura de reblandecimiento Vicat (Utracki, 2002, p. 53; Awwad, El-Latif, Konsowa y Zahran, 2009, p. 1407).

1.1.2.1. Polipropileno isotáctico (iPP)

Con la tecnología actual de catálisis se pueden sintetizar polipropilenos que alcanzan una isotacticidad de más del 95% por lo que su habilidad para cristalizar y su punto de fusión se incrementan (Calhoun y Peacock, 2006, p. 286).

Este polímero presenta diferentes estructuras cristalinas: la estructura *α*, la estructura *β* y la estructura *γ*, cada una con distintas simetrías y ordenamiento de las cadenas. (Moore, 1996, p. 118).

La cristalinidad *α* es la dominante y constituye la estructura más estable que exhibe el iPP. Este tipo de cristalinidad forma unidades monoclínicas creadas por la conformación helicoidal de los grupos metilo que rotan alrededor del eje central (Choi y White, 2005, p. 58; Moore, 1996, p. 118).

En la Figura 1.8 se aprecia la conformación del iPP.

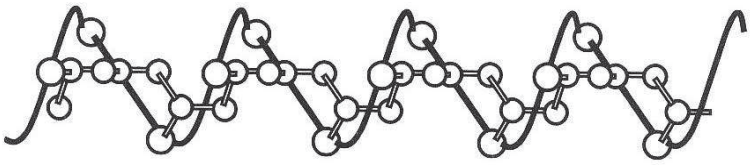


Figura 1.8. Conformación helicoidal de la estructura *α* del iPP
(Choi y White, 2005, p. 58)

Las lamelas primarias se forman de manera perpendicular al eje helicoidal y las secundarias se desarrollan de forma tangencial a las lamelas ya prexistentes lo que ocasiona que el iPP presente una microestructura sobrepuesta como se puede observar en la Figura 1.9 (Calhoun y Peacock, 2006, p. 287).

La estructura *β* exhibe unidades hexagonales, aunque existe mucha discusión y ambigüedad con respecto a su forma cristalina. Presenta mayor velocidad de cristalización, menor densidad y punto de fusión compara con la estructura *α*. La forma *β* del iPP tiene una disposición de los grupos metilo también helicoidal

como en la Figura 1.8, pero se organizan de distinta manera (Choi y White, 2005, p. 60; Moore, 1996, p. 134).

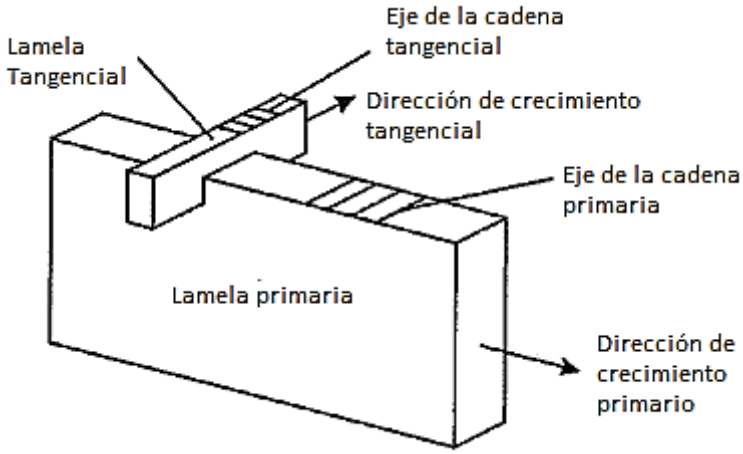


Figura 1.9. Microestructura del α-iPP con direcciones de crecimiento de las cadenas primarias y tangenciales
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 287)

Sus lamelas exhiben mayor similitud a la microestructura convencional de un polímero semicristalino que la forma *α*. Dichas lamelas se agrupan en forma paralela en la dirección cristalográfica del eje "*a*" (Moore, 1996, p. 135). En la Figura 1.10 se muestra un esquema de las lamelas en la forma *β.*

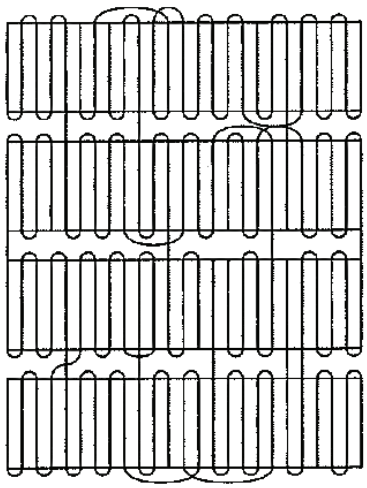


Figura 1.10 Agrupación paralela de las lamelas en el β-iPP
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 288)

La presencia de cristalinidad *γ* es poco común en muestras de iPP homopolímero obtenido bajo condiciones de procesamiento típicas. Esta estructura es la menos comprendida de todos los estados cristalinos del polipropileno isotáctico. Sus cristalitos tienen una forma similar a la estructura *α* con la diferencia que éstos se forman en las direcciones perpendicular y tangencial simultáneamente (Calhoun y Peacock, 2006, p. 289; Moore, 1996, p. 138).

Al igual que el caso anterior, existe mucha discusión acerca de su estructura cristalina. Se han hecho estudios que determinan que el *γ*-iPP tiende a formar arreglos ortorrómbicos donde se mantiene la distribución helicoidal. Sus lamelas se organizan en capas y las cadenas forman ángulos de 80° entre ellas en lugar de agruparse paralelamente. En la Figura 1.11 se muestra el arreglo mencionado (Moore, 1996, p. 138).

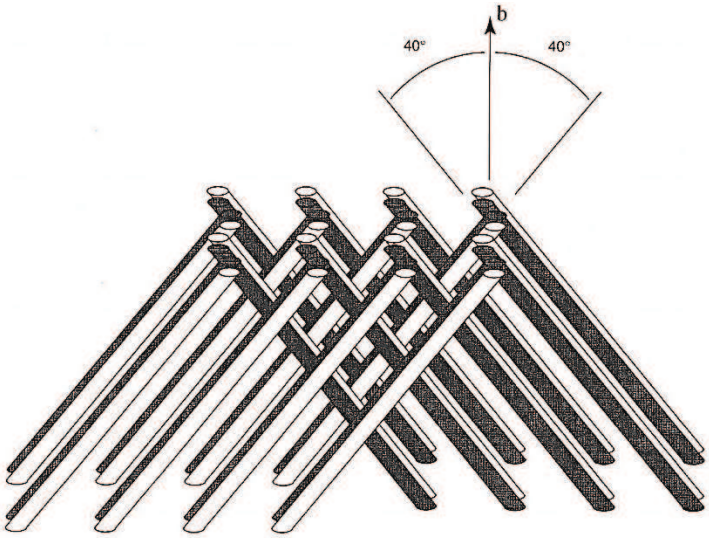


Figura 1.11. Esquema de la estructura de las cadenas en el γ-iPP, las mismas que forman 80° entre ellas y 40° con respecto a la superficie de la lamela. Las barras de color blanco representan a las cadenas con la misma quiralidad mientras que las de color negro representan a las cadenas con quiralidad opuesta
(Moore, 1996, p. 139)

1.1.2.2. Polipropileno sindiotáctico (sPP)

El polipropileno sindiotáctico posee una estructura más compleja que el isotáctico lo que impide su cristalización. Se ha determinado que el sPP puede presentar cuatro diferentes estructuras cristalinas. La forma I tiene unidades ortorrómbicas y la conformación helicoidal de las cadenas es alternada a lo largo de los ejes “a” y “*b*”. La forma II es también ortorrómbica pero la disposición helicoidal es hacia un mismo lado. La forma III presenta un arreglo en zigzag con unidades ortorrómbicas. La forma IV tiene una conformación helicoidal con unidades triclínicas (Calhoun y Peacock, 2006, p. 286; Choi y White, 2005, p. 62).

1.1.2.3. Polipropileno atáctico (aPP)

Este polipropileno contiene grupos metilo distribuidos al azar a lo largo de la cadena principal debido a la incontrolada adición de monómero durante el proceso de polimerización. Su estructura irregular impide la formación de cristalitos lo que ocasiona un descenso en sus propiedades. No es muy útil como resina termoplástica en su estado puro. Generalmente es usado como componente de adhesivos y como relleno en asfaltos (Calhoun y Peacock, 2006, p. 286).

1.1.3. TERMODINÁMICA DE MEZCLAS

Los conceptos termodinámicos aplicados a mezclas de polímeros son de amplia utilidad ya que permiten predecir, medir o interpretar ciertas propiedades como por ejemplo la miscibilidad. La determinación de dichas propiedades se basa en procesos y relaciones complejas debido a la elevada viscosidad, lenta difusión hacia el equilibrio y peligro de degradación de los polímeros (Utracki, 2002, p. 123).

Los arreglos espaciales y morfología de las mezclas son controlados por la termodinámica. En los sistemas de poliolefinas esto es de gran importancia debido a los distintos grados de ramificación que presentan los polietilenos (Kyu y Nwabunma, 2008, p. 37; Utracki, 2002, p. 123).

Alcanzar el equilibrio termodinámico también constituye un proceso complejo cuando se trabaja con polímeros a escala industrial debido a los altos flujos de producción y elevadas fuerzas de cizallamiento a las que son sometidos. Por lo tanto la miscibilidad se vuelve uno de los parámetros termodinámicos más representativos en mezclas entre polímeros (Utracki, 2002, p. 123).

1.1.3.1. Miscibilidad

La miscibilidad es la capacidad que presenta una mezcla polimérica para formar una sola fase bajo determinados rangos de presión, temperatura y composición. Dentro de las poliolefinas, este parámetro depende principalmente de la estructura molecular, de la tensión interfacial y de la concentración de los componentes en la mezcla (Hess, Horie, Stepto, Work, 2004, p. 1987; Kyu y Nwabunma, 2008, p. 50).

Las poliolefinas, comparadas con el resto de polímeros, poseen estructuras químicas simples y similares lo que permite que se mezclen con mayor facilidad a nivel molecular y puedan formar sistemas homogéneos. Cabe recalcar, que lograr una adecuada miscibilidad entre polímeros y obtener mezclas que formen una sola fase es un proceso complejo debido a su gran tamaño molecular y a la mínima entropía que se genera al mezclarlos (Arrighi y Cowie, 2005, 131; Calhoun y Peacock, 2006, p. 184).

El comportamiento de los polímeros en mezcla difiere al de los materiales de bajo peso molecular principalmente por el aporte entrópico y el efecto de la temperatura en la miscibilidad según la Ecuación 1.1:

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \qquad [1.1]$$

Donde:

ΔG_m: energía libre de Gibbs de mezclado
ΔH_m: entalpía de mezclado
ΔS_m: entropía de mezclado
T: temperatura de mezclado (K)

En las sustancias de bajo peso molecular el aumento de la temperatura favorece la miscibilidad ya que el término $T\Delta S_m$ se incrementa, como consecuencia se obtienen valores de ΔG_m más negativos ($\Delta G_m<0$). En polímeros, el término $T\Delta S_m$ es pequeño debido a la poca cantidad de entropía generada en el mezclado lo que puede ocasionar un comportamiento reversible, es decir, a mayor temperatura menor miscibilidad (Robeson, 2007, p. 11).

En general, para que dos polímeros se mezclen adecuadamente ΔG_m debe ser menor a cero. Aunque este es un requerimiento necesario, la Ecuación 1.2 también debe ser satisfecha:

$$\left.\frac{\partial^2 \Delta G_m}{\partial \emptyset_i^2}\right|_{T,P} > 0 \qquad [1.\ 2]$$

Donde:

ΔG_m: energía libre de Gibbs de mezclado
Ø: composición (usualmente fracción en volumen de uno de los componentes)

Esta ecuación constituye una condición suficiente y necesaria para que se dé un equilibrio estable o metaestable en una mezcla homogénea de una sola fase. Si el sistema es inestable la Ecuación 1.2 tomará valores negativos, es decir la mezcla se separará en fases ricas de cada componente (Robeson, 2007, p. 11; Hess et al., 2004, p. 1987).

La sensibilidad a la temperatura de las mezclas miscibles depende principalmente de sus componentes. Esto se puede apreciar en un diagrama de fases donde a temperaturas intermedias la mezcla es miscible, pero a temperaturas altas y bajas se produce una separación de las mismas (Calhoun y Peacock, 2006, p. 186).

En la Figura 1.12 se muestra un diagrama de fases de una mezcla polimérica.

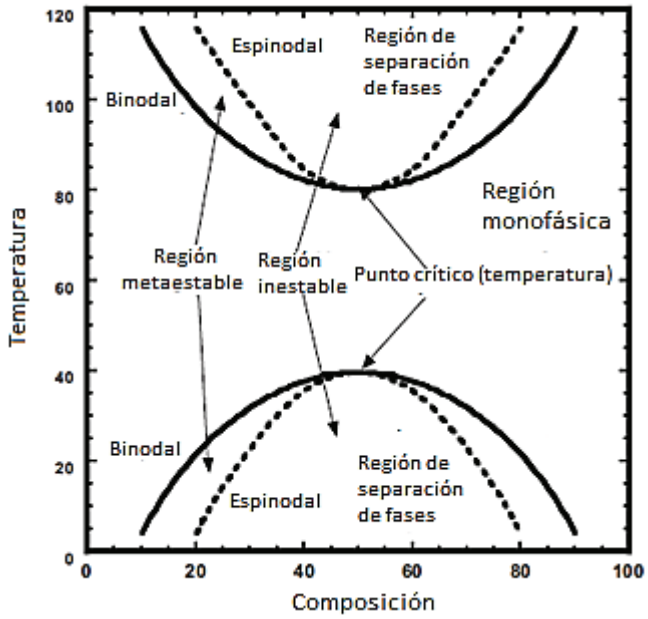


Figura 1.12. Diagrama general de fases de una mezcla polimérica. La zona intermedia del gráfico corresponde a la región de una sola fase o de miscibilidad. Las zonas comprendidas dentro de las curvas pertenecen a las regiones donde se da separación de fases o inmiscibilidad
(Robeson, 2007, p. 12)

Por otra parte, cuando una mezcla es incapaz de formar una sola fase bajo condiciones específicas de temperatura y composición se la conoce como inmiscible. Este parámetro depende de la estructura química y de las arquitecturas moleculares de los componentes de la mezcla. Existen también sistemas que son parcialmente miscibles, esto se da cuando ocurre la separación de fases pero cada una de ellas contiene aún suficiente cantidad del otro polímero como para alterar las propiedades de su fase (Hess et al., 2004, p. 1990; Robeson, 2007, p. 7).

1.1.3.2. Temperatura de transición vítrea (T_g)

La transición vítrea está relacionada con el movimiento de las cadenas de un polímero amorfo o de los dominios amorfos de un material semicristalino. Esta temperatura marca el cambio de un estado frágil o inmóvil a un estado elástico o con alta movilidad molecular (Ehrenstein, Riedel, Trawiel, 2004, p. 7).

Se la considera una transición termodinámica de segundo orden debido al incremento que se produce en la capacidad calórica del material. Este aumento no sucede a una temperatura definida (condición requerida para que alcance el equilibrio termodinámico) sino que ocurre dentro de un intervalo determinado (Menczel y Prime, 2009, p. 17).

Las poliolefinas son materiales que presentan temperaturas de transición vítrea bajo los 0 °C. A estas condiciones, las cadenas no tienen la suficiente energía para moverse. Conforme aumenta la temperatura se producen movimientos rotatorios y vibratorios hasta que toda la estructura molecular pueda tener movimientos independientementes de las cadenas aledañas (Gabbott, 2008, p. 23; Kyu y Nwabunma, 2008, p. 59).

Esta temperatura es la más importante de las transiciones que exhiben los polímeros, aunque algunos pueden presentar otras transiciones denominadas *β* y *γ* que proveen un mecanismo de disipación de energía por lo que tienen efecto en la dureza de los materiales (Gabbott, 2008, p. 23).

La T_g es un parámetro de suma importancia dentro de las mezclas de poliolefinas ya que permite determinar si existe o no miscibilidad. Se han desarrollado algunas expresiones teóricas para determinar la T_g de mezclas, la más usada es la relación de Fox que se especifica en la Ecuación 1.3 (Menczel y Prime, 2009, pp. 79).

$$\frac{1}{T_g} = \frac{m_1}{T_{g1}} + \frac{m_2}{T_{g2}} \qquad [1.3]$$

Donde:

T_g = Temperatura de transición vítrea de la mezcla (K)
T_{g1} = Temperatura de transición vítrea del componente 1 (K)
T_{g2} = Temperatura de transición vítrea del componente 2 (K)
m_1 = fracción en peso del componente 1
m_2 = fracción en peso del componente 2

Para que un sistema sea miscible debe exhibir una sola T_g cuyo valor debe encontrarse entre las transiciones vítreas de los componentes puros. Si la mezcla presenta más de una T_g, ésta es inmiscible (Kyu y Nwabunma, 2008, p. 124; Menczel y Prime, 2009, pp. 78).

Existen factores que afectan a la T_g, como el peso molecular y los plastificantes. Este efecto se observa en la Figura 1.13.

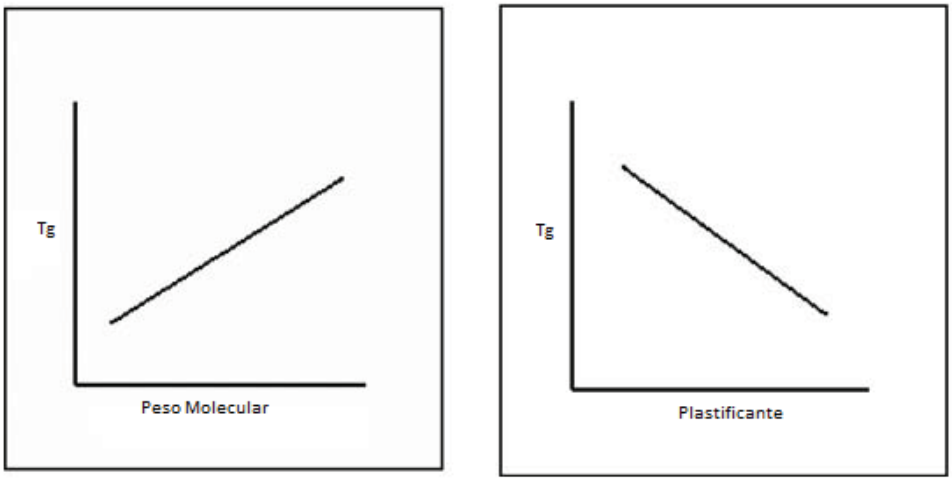


Figura 1.13. Efecto del peso molecular y del plastificante sobre la temperatura de transición vítrea. A mayor peso molecular mayor T_g y a mayor cantidad de plastificante menor T_g
(Gabbott, 2008, p. 25)

La flexibilidad de los enlaces químicos constituye otro factor importante. Polímeros que contengan enlaces CH_2-CH_2, como es el caso de la poliolefinas,

tendrán temperaturas de transición vítrea bajas mientras que moléculas más rígidas mostrarán T_g elevadas (Gabbott, 2008, p. 24).

La manera cómo se determina la T_g en polímeros se aborda en el numeral 1.2.1.7.

1.1.4. TIPOS DE MEZCLADO

1.1.4.1. Dispersivo

El mezclado dispersivo es aquel que involucra la reducción de tamaño de las partículas en la mezcla debido a la presencia de resistencias y tensiones cohesivas que producen la ruptura de los dominios de fase[1] (Rauwendaal, 1998, p. 1; Utracki, 2002, p. 578).

En la Figura 1.14 se ilustra el mezclado dispersivo.

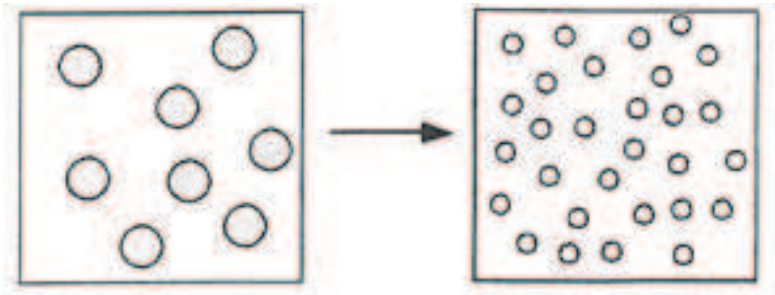


Figura 1.14 Reducción de tamaño de partícula en la mezcla por la cohesión
(Rauwendaal, 1998, p. 2)

Con partículas gruesas, de aproximadamente 1 a 5 mm de diámetro, las fuerzas que se generan entre ellas son despreciables comparadas con su peso. Al producirse la disminución de tamaño por la cohesión, tanto la masa como las

[1] El dominio de fase se relaciona con la región de la mezcla donde existe similar composición química y estado físico a nivel molecular (Hess et al., 2004, p. 2001).

fuerzas de atracción decrecen, este efecto provoca que las partículas se agrupen y se puedan obtener así mezclas de mejor calidad (Rauwendaal, 1998, p. 49).

1.1.4.2. Distributivo

El mezclado distributivo involucra la homogenización a través de la aplicación de esfuerzos sin la presencia de tensiones cohesivas entre las partículas de la mezcla (Rauwendaal, 1998, p. 2; Utracki, 2002, p. 578).

En la Figura 1.15 se aprecia la distribución de un polímero en otro.

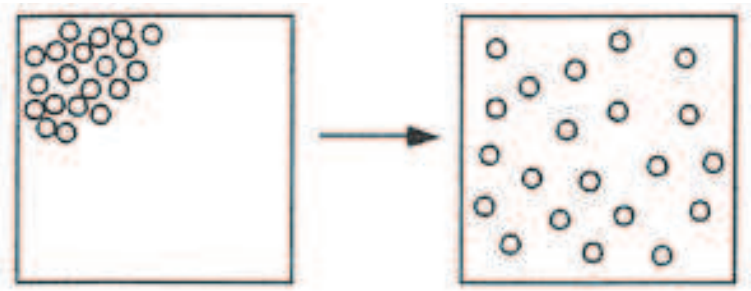


Figura 1.15. Homogenización de las partículas por la aplicación de esfuerzos
(Rauwendaal, 1998, p. 2)

En este tipo de mezclado, las partículas no reducen su tamaño sino que se colocan en arreglos espaciales por toda la matriz. Uno de los objetivos que se busca al realizar mezclas entre polímeros es que las moléculas siempre tiendan a distribuirse y dispersarse uniformemente (Calhoun y Peacock, 2006, p. 191; Rauwendaal, 1998, p. 25).

En la Figura 1.16 se observan algunos ejemplos de distribución y dispersión de mezcla poliméricas.

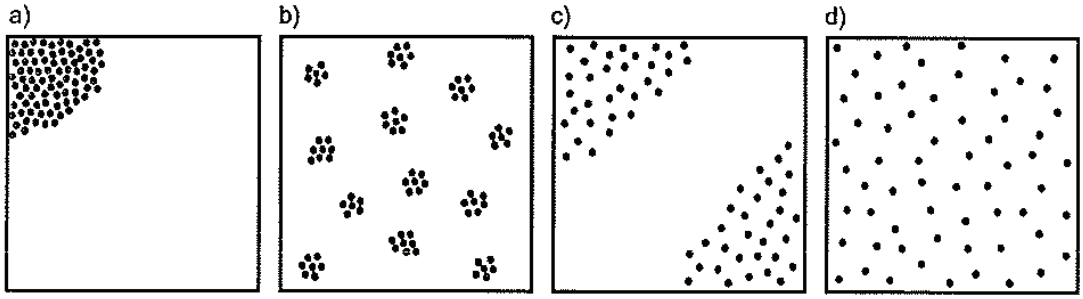


Figura 1.16. a) Mala dispersión y distribución. b) Buena distribución y mala dispersión. c) Buena dispersión y mala distribución. d) Buena distribución y dispersión
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 191)

1.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA MEZCLAS DE POLÍMEROS

1.2.1. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DSC

1.2.1.1. Introducción

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica relativamente nueva que se la empezó a desarrollar en 1963 y poco a poco ha ganado acogida dentro del mundo de los polímeros debido a la facilidad y rapidez para determinar las transiciones térmicas que se presentan en estos materiales (Menczel y Prime, 2009, p. 8).

Este análisis permite evaluar la cantidad de calor absorbido o liberado por el polímero cuando suceden eventos termodinámicos como la fusión, cristalización, transición vítrea, reticulación, entre otros. Además permite trabajar en un rango de temperaturas entre -180 °C a 700 °C con una cantidad de muestra inferior a 20 mg, lo cual representa una ventaja frente a otras técnicas (Naranjo, Noriega, Osswald, Roldán-Alzate y Sierra, 2008, p.102).

El calor que capta o disipa la muestra, tras producirse una transición, se determina como una variación de la entalpía debido a que el sistema se encuentra

a presión constante. Dicho cambio de energía se representa en un gráfico flujo de calor vs temperatura o tiempo a través de un desplazamiento en la línea base tal como se puede apreciar en la Figura 1.17. Las transiciones como la evaporación y la sublimación no se dan en los polímeros ya que por su elevado peso molecular no pueden pasar al estado gaseoso sin degradarse. (Ehrenstein et al., 2004, p. 1; Menczel y Prime, 2009, p. 16).

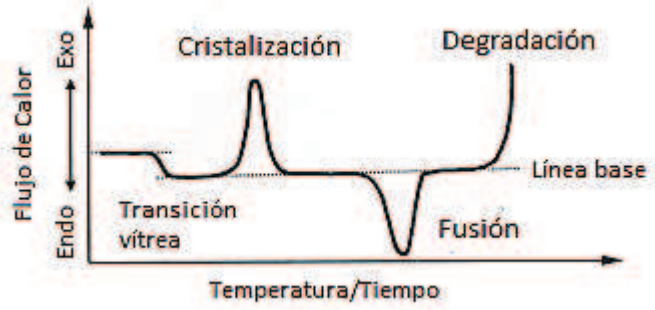
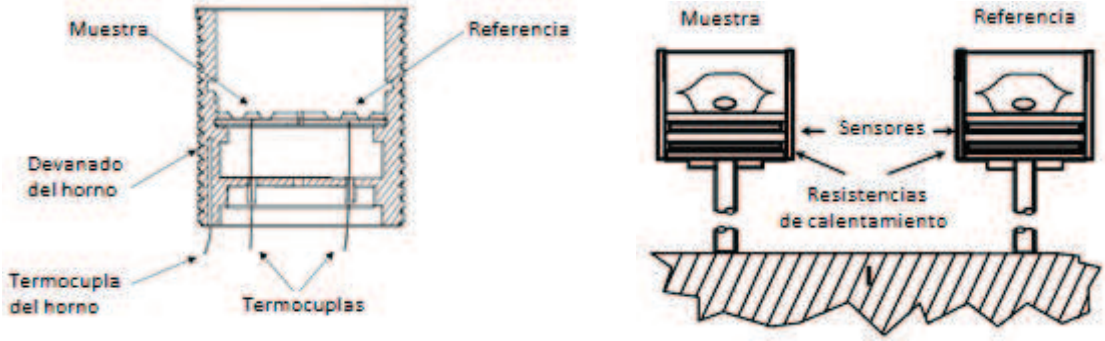


Figura 1.17. Esquema de las transiciones térmicas de un polímero que pueden identificarse con el desplazamiento de la línea base hacia procesos exotérmicos o endotérmicos (Ehrenstein et al., 2004, p. 1)

Existen dos tipos de calorímetros: el de flujo de calor y el de energía-compensación. En el primero tanto la muestra como la referencia se encuentran en un mismo horno donde la diferencia de temperatura entre ambas se registra como una medida directa de la variación del flujo de calor. En el segundo, la muestra y la referencia son separadas en dos pequeños hornos y para mantener sus temperaturas iguales, se suministra energía al presentarse una transición térmica (Brown, 1998, p. 286).

Un esquema de los hornos de los dos tipos de calorímetro se presenta en la Figura 1.18.



(a) (b)

Figura 1.18. (a) Calorímetro con flujo de calor donde la muestra y la referencia se ubican en el mismo horno con una sola fuente de calentamiento. (b) Calorímetro energía-compensación con calentamiento y horno individual para muestra y referencia (Gabbbott, 2008, pp. 47, 48)

La técnica DSC se usa ampliamente en polímeros para la determinación y estudio de:

- Temperaturas de fusión y cristalización con sus respectivas entalpías.
- Temperatura de transición vítrea.
- Reacciones químicas
- Análisis de curado (Groenewoud, 2001, p. 10).

1.2.1.2. Velocidad de calentamiento

La tasa de calentamiento, medida en °C/min, se considera como el parámetro más importante dentro de los ensayos con DSC porque influye directamente con la forma que presenta el termograma. A velocidades altas la resolución decrece considerablemente debido al elevado gradiente de temperatura que se produce dentro de la muestra pero se obtiene una mayor sensibilidad. Lo contrario ocurre a bajas velocidades, donde la resolución se incrementa pero la sensibilidad disminuye (Menczel y Prime, 2009, p. 32).

El efecto de la velocidad de calentamiento en un termograma se puede apreciar en la Figura 1.19.

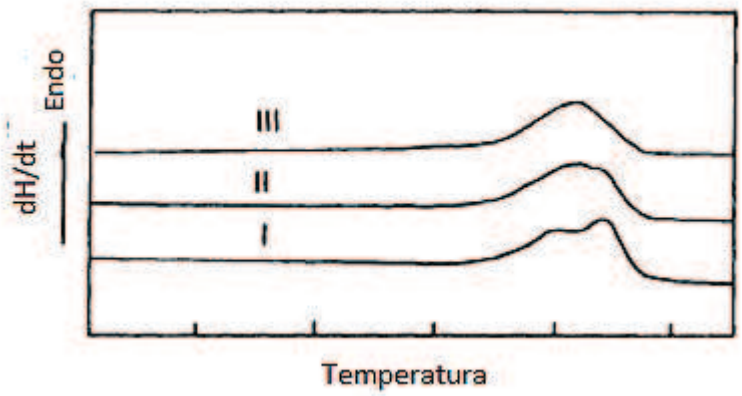


Figura 1.19. Influencia de la velocidad de calentamiento en la fusión de un material polimérico a (I) 10 °C/min, (II) 20 °C/min, (III) 40 °C/min
(Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 42)

La selección de una adecuada velocidad depende principalmente de la transición térmica a determinar ya que si ésta es pequeña y difícil de detectar, como la T_g, no es recomendable trabajar a tasas de calentamiento bajas. Otro factor que influye en la elección de la velocidad es el tiempo de análisis que responde fundamentalmente a factores económicos (Gabbott, 2008, p. 10).

La mayoría de ensayos se realizan a 10 °C/min para el análisis de temperaturas de fusión y cristalización, 20 °C/min para transiciones vítreas y 1 °C/min para la determinación de pureza (Ehrenstein et al., 2004, p. 50).

1.2.1.3. Masa de la muestra

Seleccionar la cantidad correcta de masa depende del tipo de polímero a analizar y de las transiciones térmicas de las cuales el material sea objeto. Se utiliza cantidades pequeñas que van en el orden de miligramos para reducir los problemas concernientes a la transferencia de calor hacia la muestra, la misma que debe ser representativa al tratarse de poca masa (Brown, 1998, p. 299; Gabbott, 2008, p. 10).

En polímeros reciclados la selección de la muestra debe efectuarse cuidadosamente. Este tipo de materiales pueden tener contaminantes u otros componentes en mínimas cantidades que originarían errores en los ensayos por DSC si no se escoge una muestra representativa (Sichina, 2000, pp. 1 – 4).

Cantidades excesivas de materia pueden ocasionar un incremento del gradiente de temperatura dentro de la muestra y afectar la relación lineal que existe entre la masa y el calor medido. Por otra parte, cantidades mínimas provocarán que la sensibilidad disminuya (Menczel y Prime, 2009, p. 33).

El efecto de la masa de la muestra en las curvas de los termogramas se aprecia en el Figura 1.20.

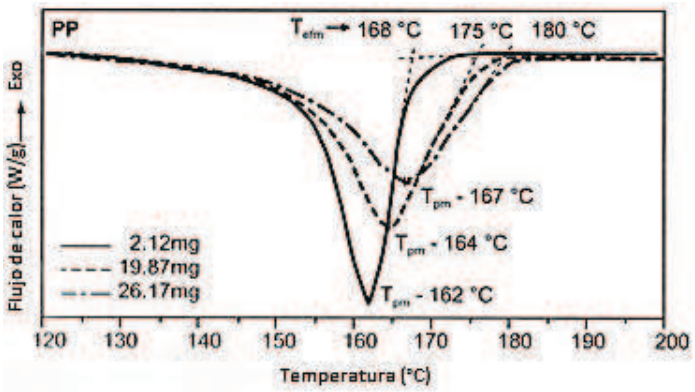


Figura 1.20. Efecto de la cantidad de muestra de un polipropileno en la sensibilidad del termograma
(Ehrenstein et al., 2004, p. 41)

Se suelen utilizar diferentes masas de polímeros de acuerdo la transición térmica a ser medida. Si se trata de la determinación de la temperatura de fusión o cristalización 1 a 10 mg es apropiado. Para el calor específico, 20 a 40 mg; para una reacción química y transición vítrea, 10 a 20 mg es aconsejable (Ehrenstein et al., 2004, p. 41).

1.2.1.4. Gas de purga

El gas de purga se usa para crear una atmósfera inerte alrededor de la muestra. Entre sus principales funciones se encuentran: eliminar cualquier material volátil que se genere luego de una transición, prevenir contaminación y oxidación de la probeta, evitar el ruido y condensación de agua a bajas temperaturas e incrementar la transferencia de calor a la muestra (Gabbott, 2008, p. 10; Menczel y Prime, 2009, p. 33).

Existe una gama de gases que se usan con estos propósitos y que se los selecciona de acuerdo al rango de temperatura de trabajo y al tipo de ensayo. Aire y oxígeno se utilizan en análisis de tiempo de inducción a la oxidación (OIT), el helio es empleado en estudios a bajas temperaturas mientras que el argón es útil sobre los 600 °C. El nitrógeno es el más usado en polímeros ya que evita la oxidación de la muestra, su conductividad térmica es adecuada para la determinación de transiciones sobre los 0 °C y es económico comparado con los otros gases (Gabbott, 2008, p. 11; Menczel y Prime, 2009, p. 34).

El manejo del flujo de gas es importante ya que define las características que tendrá la línea base. Flujos elevados causarán inestabilidad en la línea y producirán señal con ruido. Un rango recomendado de trabajo está entre 20 y 50 ml/min (Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 41).

1.2.1.5. Línea base

Dentro de la calorimetría diferencial de barrido el criterio de la línea base presenta tres significados principales:

- *Línea base del equipo* que se registra sin la presencia de celdas en el horno.
- *Línea extrapolada* de la curva del termograma en una transición cuya área va a ser integrada.
- Línea base *pre y post* transición (Menczel y Prime, 2009, p. 36).

En general existen dos clases de línea base: la tipo “recta” y la tipo “curva”. La primera es la más usada en la determinación de entalpías de fusión y cristalización especialmente de poliolefinas. La segunda suele utilizarse cuando se producen saltos en la línea base por variaciones en el Cp especialmente en reacciones químicas o reticulaciones de materiales termoestables. Los dos tipos de trazo pueden apreciarse en la Figura 1.21 (Ehrenstein et al., 2004, p. 61).

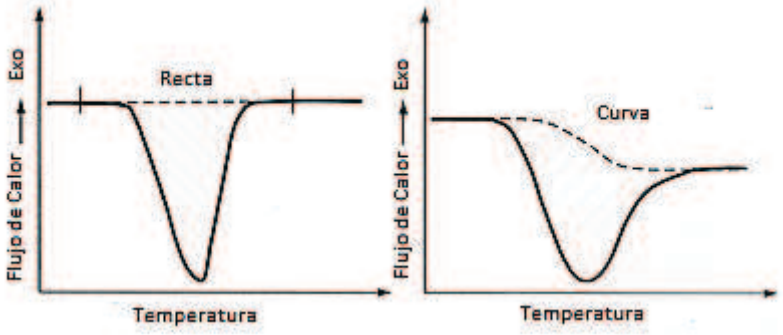


Figura 1.21. Línea base tipo recta y curva seleccionadas de acuerdo a la transición térmica (Ehrenstein et al., 2004, p. 60)

Se pueden realizar correcciones a esta línea para mejorar la resolución de la transición de interés a través de expresiones matemáticas complejas que son realizadas por el software del equipo. Estos procedimientos deben ejecutarse con sumo cuidado ya que la línea base de la muestra contiene información del cambio de la capacidad calórica en función de la temperatura y ésta podría ser alterada (Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 28).

1.2.1.6. Temperatura y entalpía de fusión

Los polímeros semicristalinos funden en un amplio rango de temperatura. Este comportamiento se debe en especial, a las imperfecciones de los cristalitos y a la desigualdad de su tamaño. Los más pequeños o los más imperfectos son aquellos que se fundirán a temperaturas más bajas. La técnica DSC mide el punto

de fusión del polímero como la temperatura a la que se obtiene el máximo flujo de calor es decir, el pico endotérmico presente en el termograma durante la transición (Groenewoud, 2001, p. 14).

La entalpía de fusión se la define como el calor que ha sido suministrado a un gramo de sustancia para que se dé el cambio de sólido cristalino a líquido isotrópico. Se lo determina como el área del pico de fusión (Menczel y Prime, 2009, p. 17).

Esta transición se la puede determinar con el método de las tangentes que se describe a continuación de acuerdo a la Figura 1.22.

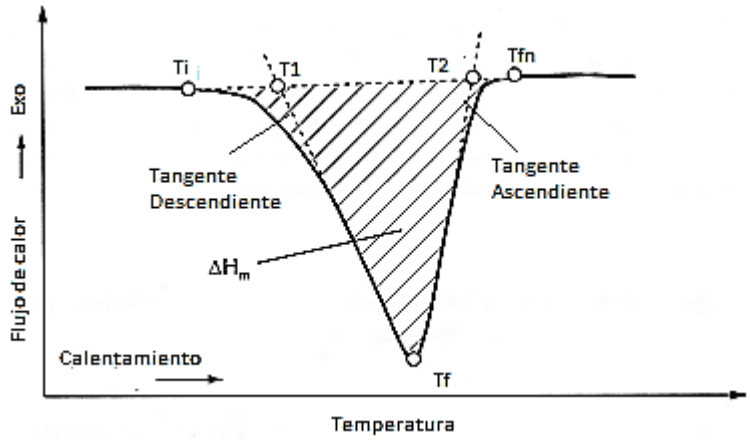


Figura 1.22. Determinación de la temperatura y entalpía de fusión de un polímero durante el calentamiento a través de las tangentes y extrapolación de la línea base
(Ehrenstein et al., 2004, p. 10)

- T_i: constituye la temperatura a la que se da el inicio de la fusión y el límite inferior de integración para el análisis de la entalpía. Este parámetro no es fácil de determinar debido a que la fusión es un proceso gradual y en ciertos polímeros, como en el PEBD y en el PELBD, esta transición puede iniciar a temperatura ambiente. Por otra parte tiene poca reproducibilidad y es un valor muy subjetivo.
- T_1: se la conoce como la temperatura “inicial” y viene dada por la intersección de la línea base extrapolada con la tangente descendiente del pico de fusión.

- T_f: constituye la temperatura de fusión del polímero. Viene dada por la intersección de las tangentes descendiente y ascendiente del pico de fusión.
- T_2: llamada también temperatura “fin”, se la determina con la intersección de la línea base extrapolada con la tangente del borde ascendiente del pico de fusión.
- T_{fn}: es la temperatura a la cual la fusión ha terminado y es el límite superior de integración para determinar la entalpía. Aquí el espécimen se encuentra en estado líquido.
- ΔH_m: variación de entalpía calculada como el área bajo la curva del pico de fusión con límites de integración T_1 y T_2 (Ehrenstein et al., 2004, p. 10; Menczel y Prime, 2009, p. 103).

1.2.1.7. Temperatura de transición vítrea

Anteriormente se expuso de manera detallada los conceptos básicos de esta transición. Ahora se especifica cómo se la determina para lo cual se debe se seguir el método de las bisectrices de acuerdo a la Figura 1.23.

- T_i: temperatura a la cual se produce la desviación de la línea base antes de la transición vítrea.
- T_1 y T_2: punto de corte de la línea base extrapolada con la bisectriz de la transición trazada por su punto medio.
- T_g: constituye la temperatura de transición vítrea en sí. Se la determina en la mitad de la variación del Cp (0,5 ΔCp).
- T_{fn}: temperatura a la cual se produce la desviación de la línea base luego de la transición vítrea (Ehrenstein et al., 2004, p. 8; Menczel y Prime, 2009, p. 62).

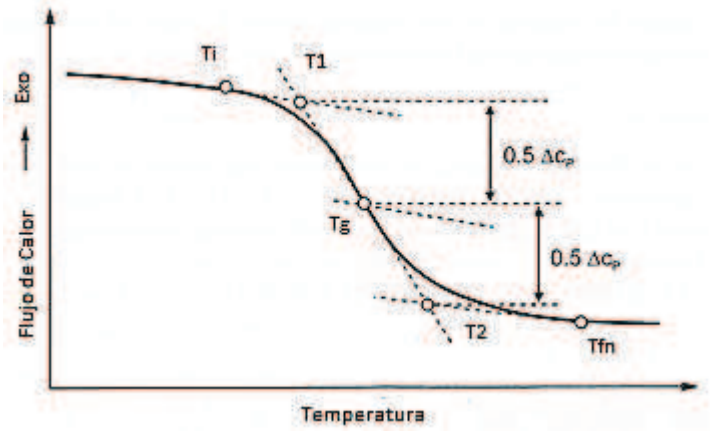


Figura 1.23. Determinación de la temperatura de transición vítrea con extrapolación de la línea base y bisectriz de la transición trazada por su punto medio
(Ehrenstein et al., 2004, p. 8)

El análisis de la T_g en los polímeros semicristalinos, como las poliolefinas, es un proceso complejo debido a que ésta se presenta como un cambio mínimo en el Cp. Para lograr una mejor determinación se puede usar la primera derivada donde dicha variación viene dada por un pico definido en la región que se encuentra la transición (Menczel y Prime, 2009, p. 69).

1.2.1.8. Temperatura de cristalización

Esta transición corresponde a la temperatura cuando se da la máxima velocidad de cristalización de un polímero. Dentro de dichos materiales, esta temperatura casi siempre es menor que la de fusión debido a la distinta estabilidad termodinámica entre los estados cristalino y fundido. Esta transición viene dada por el máximo pico en la curva del termograma. Para su determinación también se aplica el método de las tangentes al igual que la fusión, la única diferencia radica en que esta transición es exotérmica por lo el pico se presenta hacia arriba tal como se aprecia en la Figura 1.24 (Calhoun y Peacock, 2006, p. 122; Ehrenstein et al., 2004, p. 17).

Existen dos tipos de nucleaciones que marcan el inicio de la cristalización en los polímeros y son: homogénea y heterogénea. En la primera las los núcleos se forman sin la presencia de superficies externas mientras que en la segunda los núcleos de los cristalitos se crean con superficies externas que pueden ser agentes nucleantes sólidos o gaseosos, como por ejemplo la celda donde se coloca la muestra (Menczel y Prime, 2009, p. 84).

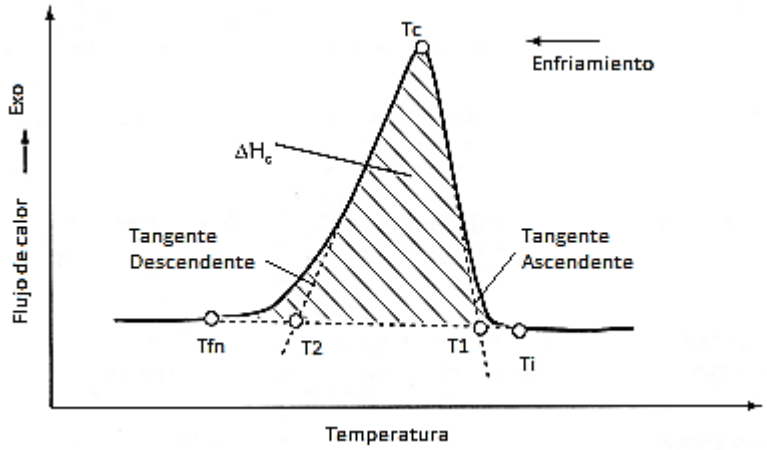


Figura 1. 24. Determinación de la temperatura de cristalización de un polímero durante el enfriamiento a través de las tangentes y extrapolación de la línea base
(Ehrenstein et al., 2004, p. 17)

1.2.1.9. Aplicación de la calorimetría diferencial de barrido a las mezclas de poliolefinas

La técnica DSC es una herramienta muy útil que permite identificar polímeros semicristalinos presentes en una mezcla ya que muchos de estos materiales presentan temperaturas de fusión características. Además es muy efectiva en este tipo de investigaciones debido a su alta sensibilidad a cambios energéticos entre polímeros. Algunos ejemplos de mezclas entre poliolefinas que se pueden analizar por DSC se presentan a continuación: PE en PP para mejorar la resistencia al impacto de este último, determinación de los copolímeros del etileno y propileno, mezclas entre diferentes tipos de polietilenos, también es posible

estimar la cantidad de monómero acetato de vinilo en el copolímero EVA y el análisis de miscibilidad por medio de la temperatura de transición vítrea como se explicó anteriormente en la sección 1.1.3.2 (Ehrenstein et al., 2004, p. 88; Gabbott, 2008, p. 231).

Además esta técnica puede entregar una aproximación de la cantidad de un polímero en una mezcla como es en el caso del sistema PEAD/PP donde las áreas de cada poliolefina muestran la proporción de los componentes como se aprecia en la Figura 1.25 (Gabbott, 2008, p. 233).

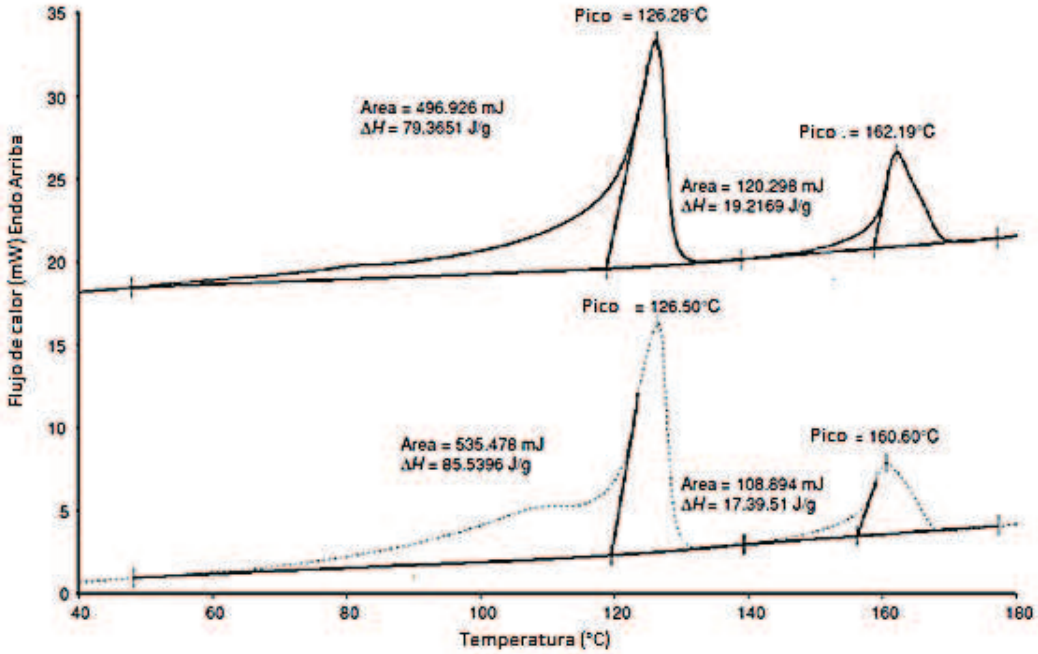


Figura 1.25. Termogramas correspondientes al primer y segundo calentamiento (curva superior e inferior respectivamente) de una mezcla PEAD-PP con 6,260 mg de muestra a 20 °C/min con dos picos de fusión pertenecientes a los materiales puros. Las áreas indican que esta mezcla tiene una proporción de 80% de PEAD y 20% de PP
(Gabbott, 2008, p. 233)

Además en la Figura 1.25, se puede establecer de manera cualitativa el tipo de poliolefina por el punto de fusión: 160,6 °C para el polipropileno y 126,5 °C para el polietileno de alta densidad (Gabbott, 2008, p. 233).

1.2.2. ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA (FTIR)

1.2.2.1. Introducción

La espectroscopía infrarroja es una técnica analítica que permite identificar materiales poliméricos a través de la interacción de las moléculas con la radiación electromagnética en la región comprendida entre 13 300 y 20 cm^{-1} (Naranjo et al., 2008, p. 8).

Entre las principales ventajas se pueden citar las siguientes: es muy versátil, de relativo bajo costo, es rápida en la identificación, utiliza poca cantidad de muestra, permite el análisis cualitativo y cuantitativo del material (Naranjo et al., 2008, pp. 8, 11).

Por medio de este método también se puede obtener información acerca de los aditivos presentes en el polímero, además de ciertas características físicas y químicas como: la estereoespecificidad, ramificaciones, insaturación, peso molecular y cristalinidad que definen la calidad del material (Coates y Nishikida, 2003, p. 2).

1.2.2.2. Movimientos moleculares

Al producirse la interacción entre las moléculas por la radiación electromagnética se originan ciertas deformaciones, vibraciones y desplazamientos en los enlaces de las cadenas del polímero. Esta energía únicamente altera dichos enlaces sin llegar a romperlos (Garton, 1992, p. 2).

Cuando ocurren estos movimientos, algunas moléculas son promovidas a un estado excitado mientras que otras pueden ser degeneradas. Cada molécula presenta un modo distinto de vibración por lo que su espectro es único (Haseth y Griffiths, 2007, pp. 4, 5).

En la Figura 1.26 se aprecian las vibraciones de una molécula de metileno.

En algunos casos, se originan movimientos conjuntos de vibración y rotación. Esto ocurre debido a fuerzas centrífugas que incrementan la longitud de los enlaces así como la velocidad angular de las moléculas (Haseth y Griffiths, 2007, p. 7).

En definitiva, cada alteración de la molécula absorbe una cantidad específica de energía, esto se traduce en un espectro con bandas características del polímero como si fuese su huella dactilar (Naranjo et al., 2008, p. 8).

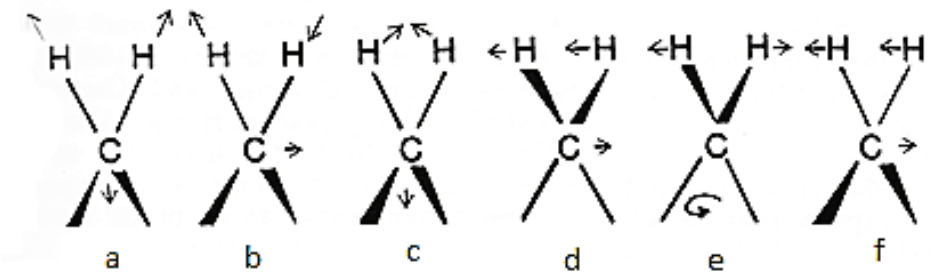


Figura 1.26. Vibraciones características del metileno a) simétrica, b) antisimétrica, c) en un plano, d) opuesta, e) giratoria, f) reversa
(Garton, 1992, p. 5)

1.2.2.3. Identificación de poliolefinas

Las poliolefinas presentan bandas características las cuales se observan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Bandas características de absorción en la región del infrarrojo del polietileno y polipropileno

Poliolefina	Bandas características (cm^{-1})
Polietileno	2 920, 1 470, 1 380, 730-720
Polipropileno	2 950, 2 920, 1 470, 1 380, 1 160, 970

(Naranjo et al., 2008, p. 17)

Estos materiales también pueden ser identificados cuando se encuentran en mezcla. En la Figura 1.27 se aprecia el espectro de un sistema PEAD/PP a diferentes concentraciones (Zambrano, 2008, p. 113).

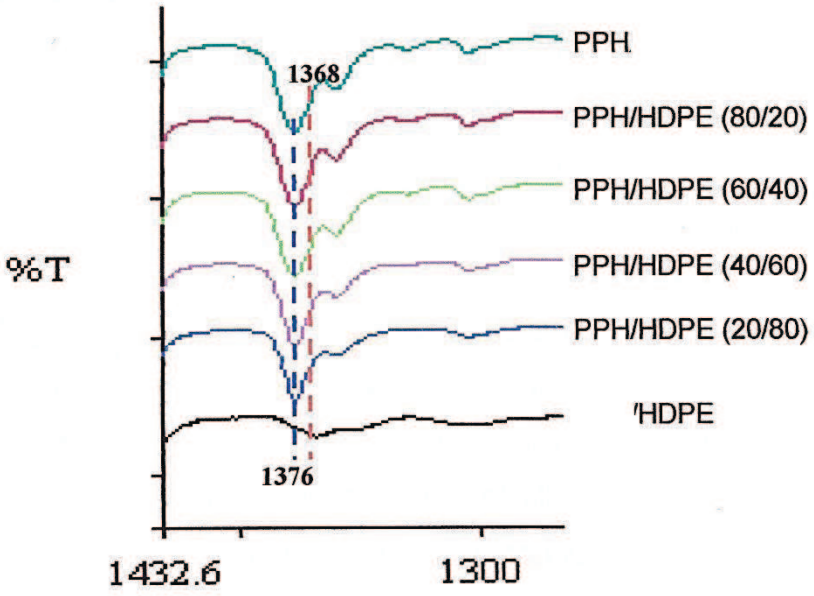


Figura 1.27. Espectro de un sistema polipropileno homopolímero y polietileno de alta densidad a distintas concentraciones entre 1432 y 1300 cm^{-1}. Se observan dos bandas a 1376 y 1368 cm^{-1} por la cantidad de grupos metilo y metileno
(Zambrano, 2008, p. 113)

Por otra parte la espectrofotometría infrarroja también puede ser utilizada para determinar miscibilidad cualitativa de mezclas. Esto es posible debido a que un componente trastorna los movimientos moleculares del otro y produce así cambios en la intensidad de los picos del espectro. Las variaciones en las bandas deben ser menores a 10 cm^{-1} para especificar que un sistema es miscible, aunque este valor depende mucho de la mezcla analizada (Garton, 1992, p. 183).

1.3. RECICLAJE DE POLIOLEFINAS

1.3.1. INTRODUCCIÓN

El uso de plásticos a nivel mundial se ha incrementado en las últimas décadas. De acuerdo con estudios realizados por Plastics Europe (2012), la producción global de plástico llegó a los 280 millones de toneladas para el año 2011. En la Figura 1.28 se observa su crecimiento progresivo (p. 6).

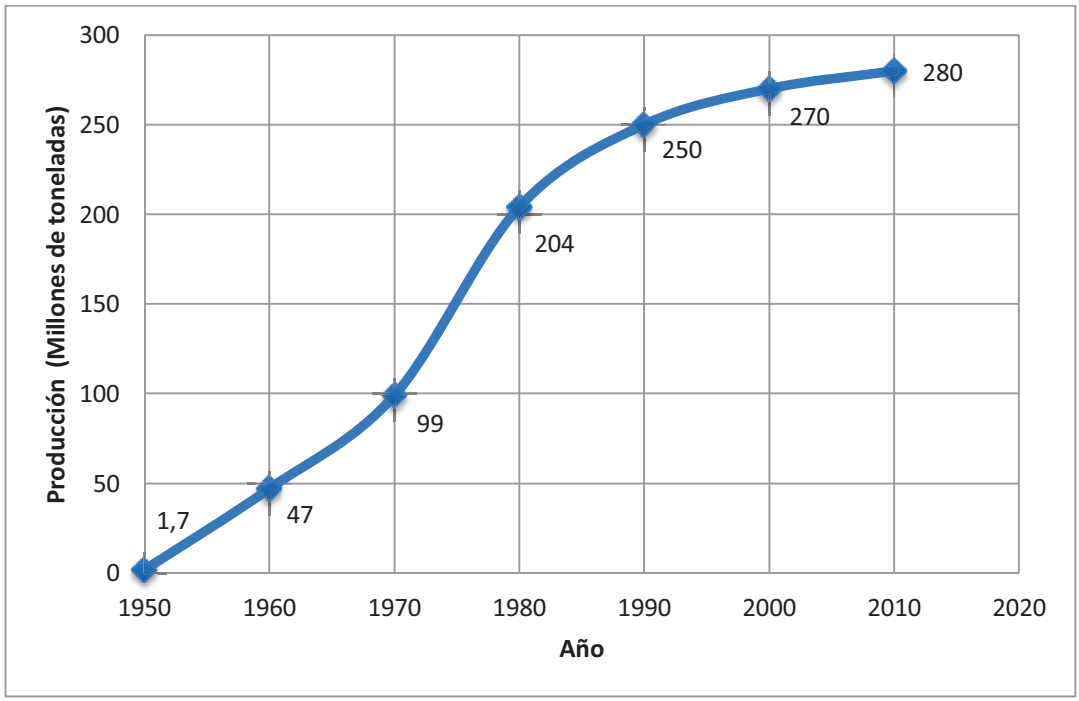


Figura 1.28. Crecimiento de la producción mundial de plástico desde 1950 hasta 2011 (Plastics Europe, 2012, p. 6)

Para los polímeros termoplásticos las proyecciones dictan que su fabricación se incrementará en un promedio de 20 millones de toneladas por año. Esto implica que, para una población mundial de alrededor de 6 billones de personas y un consumo per cápita de 150 kilogramos por año, se generará un nivel de saturación de 900 millones de toneladas de plástico, de las cuales solo una pequeña porción es recuperada (Utracki, 2002, p. 1118).

El reciclaje de termoplásticos, en especial de las poliolefinas que constituyen más del 40% de la producción mundial, es considerado como una alternativa viable para la recuperación de materiales y energía además de aminorar los residuos sólidos en botaderos (Plastics Europe, 2012, p. 8; Utracki, 2002, p. 1118).

La tecnología del mezclado de poliolefinas es una manera factible de reciclaje debido a que mejora el rendimiento del material, prolonga su uso y regenera su morfología. Este proceso presenta los siguientes beneficios:

- Aumento en la uniformidad del producto.
- Cambios rápidos de formulación en planta.
- Método económico para el desarrollo de nuevos materiales.
- Permite el uso de polímeros reciclados con materia prima virgen.
- Procesamiento en equipos estándar.
- Mezclas elaboradas pueden ser procesadas más de una vez (Utracki, 2002, pp. 1121, 1122).

1.3.2. INCONVENIENTES EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS

La creciente demanda de plástico a nivel mundial se ha constituido en un gran inconveniente debido a los problemas que se originan en el manejo y eliminación de estos residuos (Mark, 2003, p. 657).

El Ecuador no es la excepción en cuanto al aumento del uso de plástico, específicamente de poliolefinas. De acuerdo a estadísticas del Banco Central, en 2010 el país importó cerca de 170 mil toneladas entre polipropileno y polietilenos de alta y baja densidad. Para el 2011 las importaciones alcanzaron las 180 mil toneladas lo que refleja la gran demanda local de estos productos. En la Figura 1.29 se detallan dichas importaciones (Banco Central del Ecuador, 2012).

De aquí surge una problemática relacionada con la gestión de residuos sólidos en el país ya que la mayoría de servicios de aseo urbano carecen de amplia

cobertura, eficiencia y calidad. Con base en el Análisis Sectorial de Residuos Sólidos Ecuador, de todos los desechos generados a nivel nacional se recolecta únicamente el 49% y de este valor tan solo el 30% es confinado. En otras palabras, existe un manejo inadecuado de estos residuos (EMASEO, 2010, p. 8).

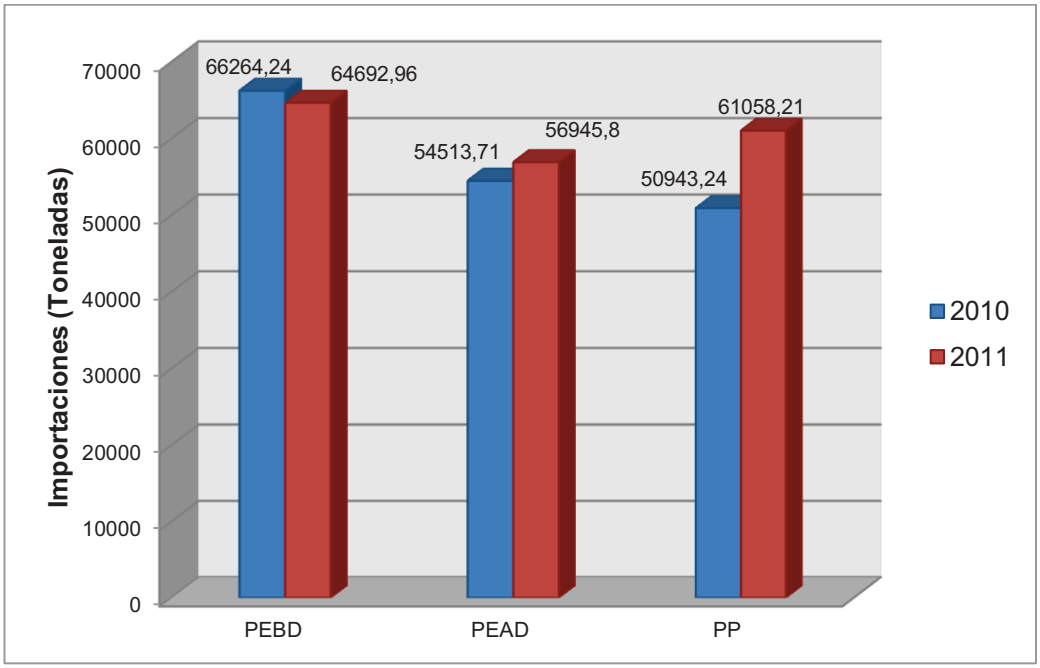


Figura 1.29. Importación de poliolefinas del Ecuador entre los años 2010 y 2011
(Banco Central del Ecuador, 2012)

En el Distrito Metropolitano de Quito se recogen diariamente 1 622 toneladas de desperdicios de los cuales el plástico ocupa el segundo lugar con 13,12%. De esta cantidad se recicla menos del 8%. Por otra parte, los domicilios son los mayores generadores de basura donde no existe una cultura de separación de residuos por lo que el reciclaje a escala industrial debe incluir más procesos para obtener un mejor producto final (EMASEO, 2010, p. 10).

El color y la composición del producto terminado es otra preocupación ya que los materiales desechados, que ahora constituyen la materia prima, están elaborados de una amplia gama de resinas y pueden presentar altos contenidos de aditivos. Además se puede originar contaminación del producto final debido a las etiquetas,

pegamento y ciertos residuos que no pudieron ser eliminados en el lavado (Mark, 2003, p. 660).

Otro factor a tomar en cuenta es que los materiales que van a ser reciclados ya han sido sometidos a calentamientos y a elevados esfuerzos en su primer procesamiento por lo que se pudieron degradar parcialmente. Esto ocasiona una disminución en las propiedades físicas comparadas con una resina virgen, además afecta en el proceso ya que se requieren otros parámetros de operación para evitar su degradación (Calhoun y Peacock, 2006, p. 259).

La diferencia de índices de fluidez entre las poliolefinas que se van a combinar debe ser mínima para asegurar un buen mezclado. Este parámetro, para la mayoría de materiales reciclados, es desconocido por lo que constituye un inconveniente en el proceso. Se recomiendan polímeros de bajo índice de fluidez para extrusión y de altos para inyección (Mark, 2003, p. 661).

Antes de que un polímero sea reciclado debe ser recogido, lavado descontaminado y separado. La recolección de plástico generalmente no es un proceso técnico por lo que puede afectar a las etapas siguientes. Además la separación, si se la realiza por densidad, constituye un riesgo especialmente para los polietilenos ya que presentan valores muy cercanos de esta propiedad física (Utracki, 2002, p. 1137).

1.3.3. PROCESAMIENTO DE PLÁSTICO RECICLADO

Existen cuatro tipos de procesamiento de plástico: primario, secundario, terciario y cuaternario los cuales se describen a continuación.

El reciclaje primario consiste en añadir material triturado, rebabas de moldes o piezas defectuosas a la corriente de polímero virgen para reprocesar la mezcla. Este tipo de reciclaje no presenta muchos inconvenientes ya que el material añadido se encuentra, generalmente limpio y no está térmicamente degradado. Se sugiere agregar un máximo de 10% a la corriente de material virgen aunque

este valor puede variar de acuerdo al polímero usado (Mark, 2003, p. 663; Peacock, 2000, p. 509).

El reciclaje secundario tiene como inicio la recolección de la materia prima. Esto depende mucho del tipo y de la localización del botadero así como de la clasificación de los residuos desde los hogares (Utracki, 2002, p. 1137).

Algunos fabricantes de plástico colocan en sus productos códigos de reciclaje para facilitar las tareas de recolección y separación (Calhoun y Peacock, 2006, p. 261).

En la Figura 1.30 se observan los códigos para ciertos polímeros.

PET PEAD V PEBD PP PS Otros

Figura 1.30. Códigos de reciclaje SPI para materiales plásticos
(Mark, 2003, p. 660)

Posteriormente las poliolefinas deben ser separadas de otros tipos de plástico y de contaminantes. Para esto se usa la inspección visual y también la diferencia de algunas propiedades físicas entre los materiales que pueden ser: densidad, cristalinidad, solubilidad, color u opacidad entre otras. Luego los materiales son lavados, triturados, secados y almacenados para luego ser procesados en un extrusor y por último granulados (Utracki, 2002, p. 1137; Calhoun y Peacock, 2006, p. 262).

El reciclaje terciario se basa en la depolimerización del plástico para obtener productos químicos intermedios como combustibles, aceites, hidrocarburos de bajo peso molecular y ciertos gases. Este tipo de reciclaje se lo puede hacer de diferentes maneras. Generalmente las poliolefinas se depolimerizan a altas temperaturas en atmósfera controlada de oxígeno, hidrógeno o de algún catalizador. Este proceso se lo puede efectuar en lechos fluidizados, hornos rotatorios o autoclaves (Calhoun y Peacock, 2006, p. 264; Peacock, 2000, p. 513).

Finalmente, el reciclaje cuaternario involucra la recuperación de energía a través de la combustión del plástico bajo condiciones controladas. Este material puede generar entre 22 000 y 48 000 kJ/kg. Los polietilenos pueden aportar hasta con 23 000 kJ/kg al proceso. Este tipo de reciclaje debe ser adecuadamente supervisado debido a los gases tóxicos que se pueden generar en la combustión de algunos materiales como el PVC o los Nylons (Calhoun y Peacock, 2006, p. 264; Mark, 2003, p. 667).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

2.1.1. POLIOLEFINAS COMERCIALES

Para el presente estudio se utilizaron tres tipos de polietilenos y un polipropileno de diferentes casas comerciales en forma de pellets. Estos materiales se describen en la Tabla 2.1 con su respectiva identificación. Las fichas técnicas se adjuntan en el Anexo I.

Tabla 2.1. Poliolefinas usadas en el estudio

Poliolefina	Identificación	Casa Comercial
Polietileno de alta densidad	PEAD	LG Chem Lutene-H ME8000
Polietileno de baja densidad	PEBD Dow	The Dow Chemical Company 132G
	PEBD Hanwha	Hanwha Chemical 5302
	PEBD Lotrene	QAPCO Lotrene® FB3003
Polietileno lineal de baja densidad	PELBD Braskem	Braskem 118
	PELBD Dowlex	The Dow Chemical Company DowlexTM 2645G
	PELBD Taisox	Formosa Chemicals & Fibre Corporation Taisox 3210
Polipropileno	PP	SK Energy Yuplene H360F

2.1.2. CONTENIDO DE CENIZAS

Para la determinación del porcentaje de inorgánicos presentes en las poliolefinas se trabajó de acuerdo a lo establecido en el procedimiento A de la norma ASTM D 5630-06. Se realizaron mediciones por triplicado para cada muestra, se utilizaron tres crisoles de porcelana de 50 ml cada uno, una balanza analítica Denver

Instrument Company AA-200, 200 g, 0,0001 g y una mufla VULCAN^{TM} A-130, 1100 °C, 50 °C.

Los crisoles usados en el ensayo fueron previamente tarados en la mufla antes descrita a 500 °C por 15 minutos. Los cálculos respectivos se adjuntan en el Anexo II.

2.1.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Este ensayo se lo realizó con base en la norma ASTM D 792-08. Se trabajó con una balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200, 200 g, 0,0001 g y con un conjunto para determinación de densidades METTLER-TOLEDO. Se realizaron mediciones por triplicado con alcohol etílico absoluto anhidro, 99,9%, J. T. Baker como líquido de inmersión a una temperatura de trabajo entre 18 y 19 °C que fue medida con un termómetro METTLER-TOLEDO, 51,5 °C, 0,5 °C.

Las densidades de las poliolefinas fueron corregidas con respecto a la temperatura de trabajo. Los cálculos y la tabla de densidades de etanol se adjuntan en los Anexos III y IV respectivamente.

2.1.4. ANÁLISIS TÉRMICO POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Los análisis térmicos fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM D 3418-08 en un calorímetro diferencial de barrido marca Netzsch modelo DSC F1 204 Phoenix, 700 °C, 0,1 °C con dos dispositivos para enfriamiento: un intracooler que permite llegar hasta -80 °C y un recipiente para nitrógeno líquido de 26 kg de capacidad con el que se puede alcanzar temperaturas hasta -150 °C aproximadamente.

Se trabajó en atmósfera inerte con un flujo de 20 ml/min de nitrógeno gaseoso seco, grado 4,8, Indura. Se realizaron ensayos por triplicado, excepto para la determinación de la T_g, se utilizó una balanza Shimadzu modelo Libror AEL-40SM, 42 g, 0,00001 g y celdas de aluminio de 25 µl para colocar las muestras. Los termogramas obtenidos fueron analizados en el software Netzsch Proteus.

2.1.4.1. Calibración y validación

Se siguió el procedimiento de calibración indicado en el manual del equipo "Software Manual DSC Instruments, Temperature and Sensitivity Calibración" cuyos pasos y termogramas de los estándares se adjuntan en el Anexo V. Se trabajó a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y un flujo de 20 ml/min de nitrógeno seco.

Esta calibración se la realizó con cinco estándares de alta pureza que se especifican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Pureza de los estándares usados en la calibración del calorímetro DSC F1 204 Phoenix

Estándares	Pureza (%)	Casa Comercial
Hg	99,990	Netzsch
In	99,999	
Sn	99,990	
Bi	99,999	
Zn	99,999	

Para validar la calibración, se trabajó con tres estándares: Hg, In y Sn. Los ensayos se realizaron con las curvas de calibración calculadas. Los valores de temperatura inicial y entalpía de fusión obtenidos fueron comparados con datos bibliográficos y se determinó el error.

2.1.4.2. Determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión

Para el análisis de la temperatura de cristalización se tomó en cuenta el primer enfriamiento a 10 °C/min, mientras que para la temperatura y entalpía de fusión se trabajó en el segundo calentamiento a 10 °C/min. Para la determinación de estos parámetros en los polietilenos se siguieron los pasos descritos a continuación:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 180 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 180 °C por 5 minutos.
3. Enfriamiento desde 180 °C hasta 40 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a 40 °C por 5 minutos.
5. Calentamiento desde 40 °C hasta 180 °C a 10 °C/min.
6. Paso isotérmico a 180 °C por 5 minutos.
7. Enfriamiento desde 180 °C a 60 °C a 10 °C/min.

Para el polipropileno se trabajó con:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 200 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 200 °C por 5 minutos.
3. Enfriamiento desde 200 °C hasta 40 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a 40 °C por 5 minutos.
5. Calentamiento desde 40 °C hasta 200 °C a 10 °C/min.
6. Paso isotérmico a 200 °C por 5 minutos.
7. Enfriamiento desde 200 °C a 60 °C a 10 °C/min.

2.1.4.3. Determinación de la temperatura de transición vítrea

Para el análisis de esta temperatura en los polietilenos se utilizó nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento, pero debido a lo costoso de este insumo se realizó una sola repetición y exclusivamente para los polietilenos que formaron parte de

las mezclas tal como se puede apreciar más adelante en la Figura 2.1. La determinación de esta transición se llevó a cabo con los siguientes pasos:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 180 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 180 °C por 3 minutos.
3. Enfriamiento desde 180 °C hasta -150 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a -150 °C por 15 minutos.
5. Calentamiento desde -150 °C hasta 150 °C a 20 °C/min.
6. Enfriamiento desde 150 °C a 30 °C a 20 °C/min.

Para el PP sí se realizaron ensayos por triplicado debido a que se usó un intracooler como dispositivo de enfriamiento. Se siguieron los pasos descritos a continuación:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 200 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 200 °C por 5 minutos.
3. Enfriamiento desde 200 °C hasta -70 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a -70 °C por 5 minutos.
5. Calentamiento desde -70 °C hasta 180 °C a 20 °C/min.
6. Paso isotérmico a 180 °C por 5 minutos
7. Enfriamiento desde 180 °C a 60 °C a 10 °C/min.

La temperatura de transición vítrea para los dos materiales se determinó en el segundo calentamiento a 20 °C/min. Se usó además el mínimo de la primera derivada para facilitar su determinación.

2.1.5. ANÁLSIS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA

Se realizaron análisis en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Espectrum One a los tres polietilenos lineales de baja densidad para determinar el tipo de comonómero presente en cada material. Se elaboraron planchas de los polietilenos en una prensa calefactora Carver modelo 2112-2, 400 °C, 5 °C; 500 psi; 7 000 psi a una temperatura de 160 °C por 60 segundos y con una presión de

1 160 psi. Los espectros fueron obtenidos a una resolución de 2 cm^{-1} con 60 barridos en el rango comprendido entre 500 y 4000 cm^{-1} (Prasad, 1998, pp. 1717).

Este ensayo se aplica solo para los polietilenos lineales de baja densidad y no para el resto de poliolefinas comerciales.

2.2. EVALUACIÓN DE LA MISCIBILIDAD DE MEZCLAS DE POLIOLEFINAS

2.2.1. ELABORACIÓN DE MEZCLAS

Las mezclas se realizaron en un reómetro de torque electrónico Haake modelo Rheomix 600P con rotores tipo Roller a una velocidad de giro de 40 rpm, por un tiempo máximo de 6 minutos a 180 °C. Se utilizó una balanza METTLER-TOLEDO modelo PG5002-S, 5 100 g, 0,01 g. La cámara de mezclado del reómetro se llenó a un 70% de su capacidad. Los cálculos para determinar los pesos de las muestras se encuentran en el Anexo VI.

Se trabajó con dos sistemas: PEBD/PELBD y PEAD/PP a diferentes concentraciones en peso las mismas que se especifican en la Figura 2.1. Para el primer sistema se realizó una selección de polietilenos con la elaboración de mezclas al 5% de PELBD en PEBD.

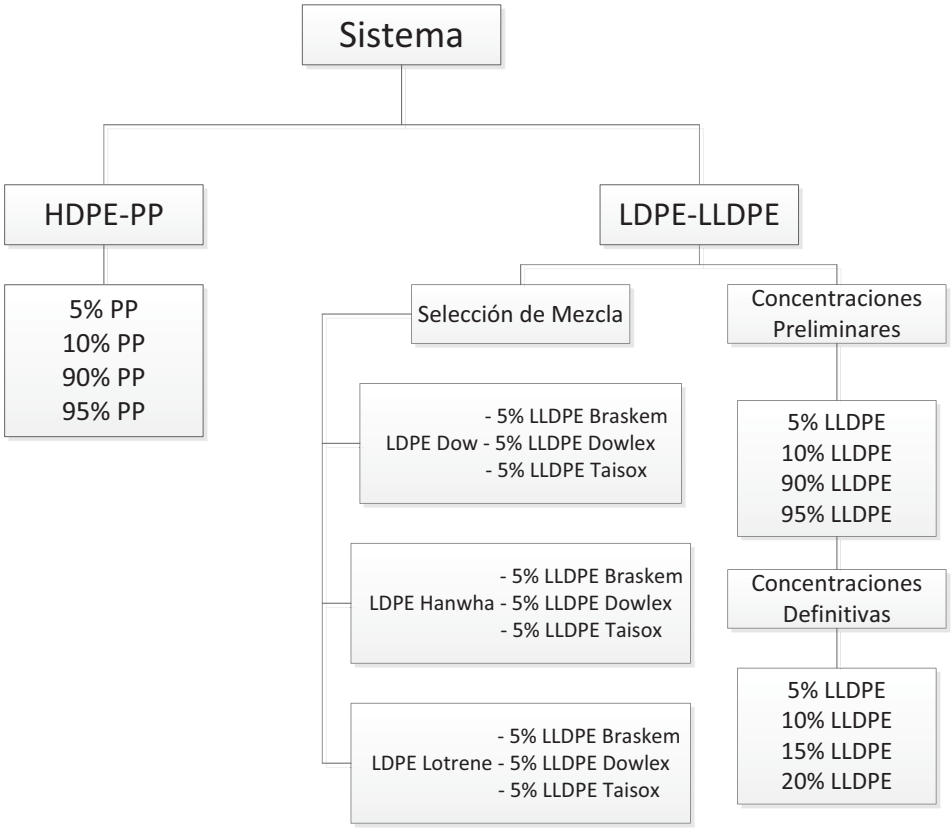


Figura 2.1. Esquema de las mezclas elaboradas a diferentes concentraciones en peso

2.2.2. EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN Y DISTRIBUCIÓN

A partir de las mezclas elaboradas se realizaron probetas por moldeo a compresión en una prensa calefactora Carver modelo 2112-2, 400 °C, 5 °C; 500 psi; 7 000 psi mediante el uso de moldes tipo flash cuyas especificaciones se muestran en la Figura 2.2. Para el sistema PEBD/PELBD se trabajó a 200 °C y 4 000 psi mientras que para sistema PEAD/PP a 210 °C y 4 000 psi.

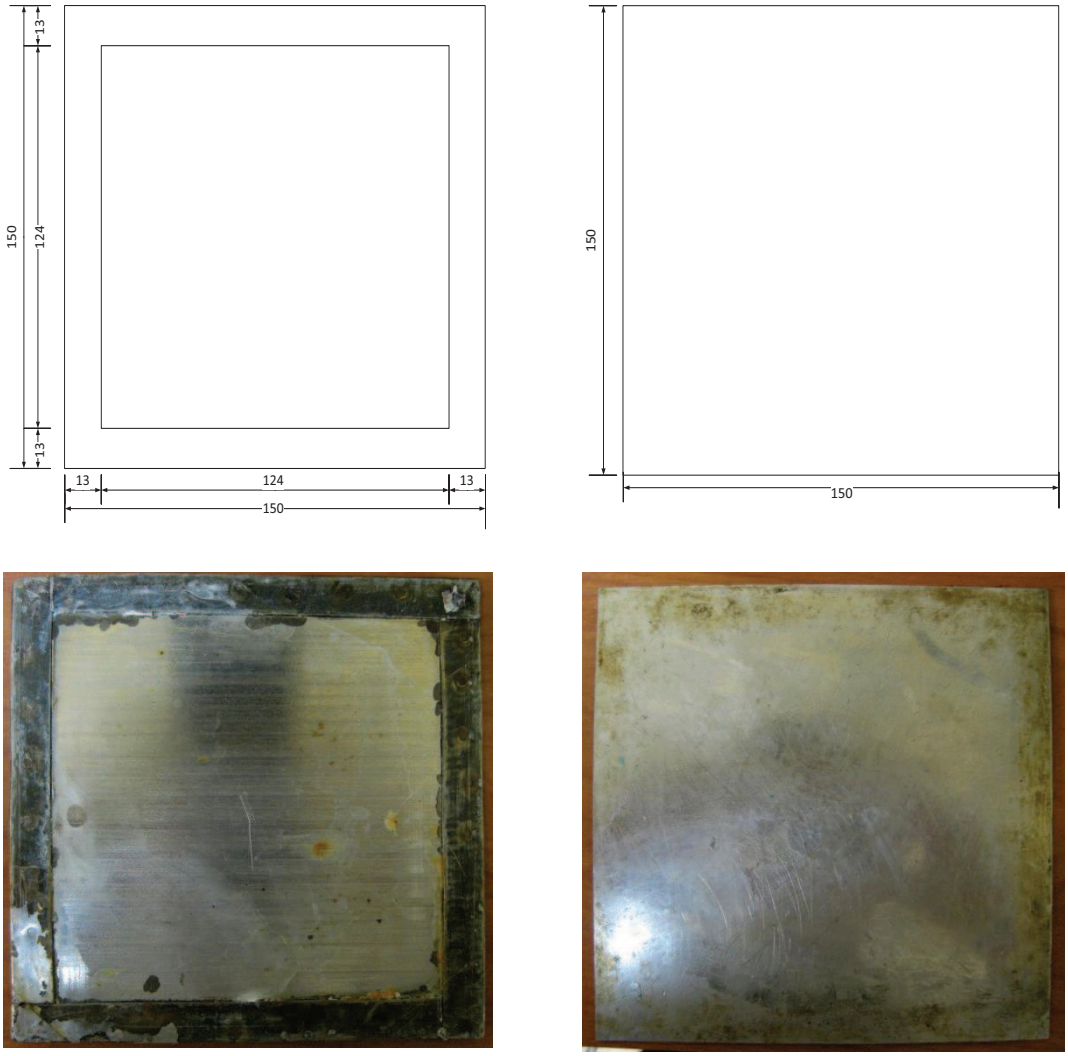


Figura 2.2. Moldes tipo flash con sus respectivas dimensiones (mm) usados para la elaboración de probetas

Las probetas obtenidas fueron analizadas en una lámpara de luz fluorescente de acuerdo al procedimiento establecido en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros CIAP de la Escuela Politécnica Nacional para mezclas de poliolefinas. Cabe recalcar que este método se usa únicamente para inspecciones macroscópicas de las probetas. A continuación se describe el procedimiento:

- Se realizó un sistema de cuadrículas de 10 × 10 de acuerdo a las dimensiones internas del molde tipo flash (124 × 124 mm).
- La cuadrícula fue impresa en papel de acetato a escala 1:1 con el objeto de colocarla sobre la probeta de la mezcla.

- El conjunto probeta-cuadrícula se colocó sobre la lámpara de luz fluorescente.
- Se tomaron fotografías a una distancia vertical aproximada entre 20 y 30 cm de las probetas.

Éstas fueron comparadas con cuatro estándares para mezclas de poliolefinas que se muestran a continuación en la Figura 2.3.

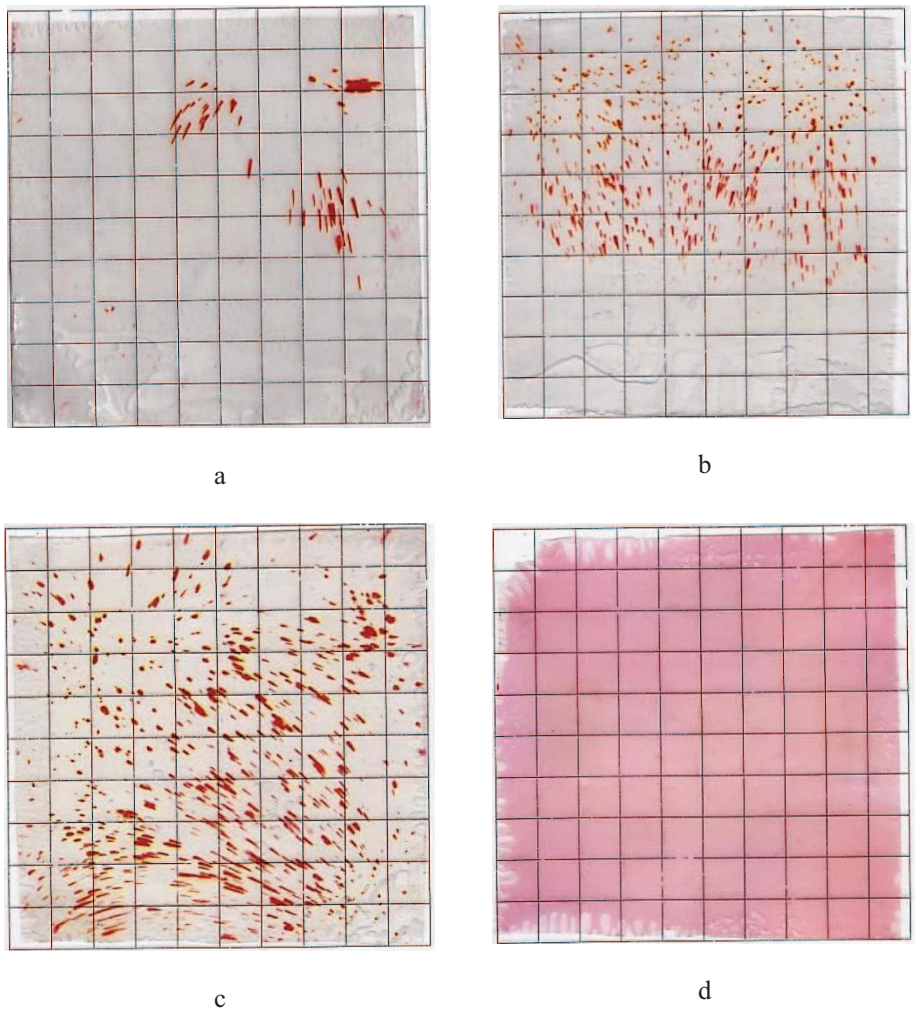


Figura 2.3. Estándares para evaluación de dispersión y distribución de mezclas de poliolefinas: a) mala dispersión y distribución, b) buena dispersión, mala distribución, c) mala dispersión, buena distribución y d) buena dispersión y distribución

Para evaluar el porcentaje de distribución, se contabilizaron los cuadros que contienen pigmentos rojos de cada estándar y se dividió para cien.

Para determinar el porcentaje de dispersión, de los cuadros tomados en cuenta en la distribución, se seleccionaron los de mayor contenido de pigmentos y de igual manera se dividió para cien.

2.2.3. ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS MEZCLAS POR DSC

2.2.3.1. Determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión

El análisis de la temperatura de cristalización de las mezclas se lo efectuó en el primer enfriamiento a 10 °C/min. Para el estudio de la temperatura y entalpía de fusión se trabajó en el segundo calentamiento, de igual manera, a 10°C/min. Estos parámetros fueron determinados de acuerdo a lo explicado en los numerales 1.2.1.6 y 1.2.1.8 con ayuda del Software Netzsch Proteus.

Tanto para la selección de polietilenos como para el sistema PEBD/PELBD, se trabajó con los siguientes pasos:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 180 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 180 °C por 5 minutos.
3. Enfriamiento desde 180 °C hasta 40 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a 40 °C por 5 minutos.
5. Calentamiento desde 40 °C hasta 180 °C a 10 °C/min.
6. Paso isotérmico a 180 °C por 5 minutos.
7. Enfriamiento desde 180 °C a 60 °C a 10 °C/min.

Los termogramas para el sistema PEAD/PP fueron obtenidos de la siguiente manera:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 200 °C a 10 °C/min.

2. Paso isotérmico a 200 °C por 5 minutos.
3. Enfriamiento desde 200 °C hasta 30 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a 30 °C por 5 minutos.
5. Calentamiento desde 30 °C hasta 200 °C a 10 °C/min.
6. Paso isotérmico a 200 °C por 5 minutos.
7. Enfriamiento desde 200 °C a 60 °C a 10 °C/min.

2.2.3.2. Determinación de la temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea se determinó para los sistemas PEBD/PELBD con las concentraciones definitivas y PEAD/PP en el segundo calentamiento a 20 °C/min con el método de las bisectrices expuesto en el numeral 1.2.1.7 con el Software Netzsch Proteus.

Los termogramas para el sistema PEBD/PELBD se obtuvieron con los siguientes pasos:

1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 180 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 180 °C por 3 minutos.
3. Enfriamiento desde 180 °C hasta -150 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a -150 °C por 15 minutos.
5. Calentamiento desde -150 °C hasta 150 °C a 20 °C/min.
6. Enfriamiento desde 150 °C a 30 °C a 10 °C/min.

Para el sistema PEAD/PP se trabajó con los pasos descritos a continuación:

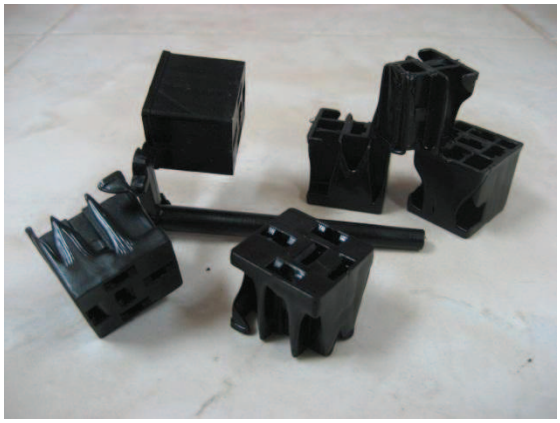
1. Calentamiento desde temperatura ambiente hasta 190 °C a 10 °C/min.
2. Paso isotérmico a 190 °C por 3 minutos.
3. Enfriamiento desde 190 °C hasta -150 °C a 10 °C/min.
4. Paso isotérmico a -150 °C por 15 minutos.
5. Calentamiento desde -150 °C hasta 150 °C a 20 °C/min.
6. Enfriamiento desde 150 °C a 30 °C a 10 °C/min.

2.3. APLICACIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DEFINIDAS PARA LA MEZCLA DE POLIOLEFINAS COMERCIALES A MATERIALES RECICLADOS SELECCIONADOS

2.3.1. POLIOLEFINAS RECICLADAS

Se recolectaron envases de PEAD provenientes de productos cosméticos y de aseo. Para el PP se utilizó conectores eléctricos que en el momento de su fabricación presentaron fallas y que iban a ser desechados. Estas poliolefinas se muestran en la Figura 2.4.

PEAD



PP

Figura 2.4. Poliolefinas recicladas usadas en la investigación

Estos materiales fueron triturados en un molino Shini modelo SG-2348E (S) previo a la realización de los ensayos requeridos para su caracterización.

2.3.2. CONTENIDO DE CENIZAS Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Estos ensayos se los realizaron de acuerdo a lo descrito en los numerales 2.1.2 y 2.1.3.

2.3.3. ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA

Se realizaron planchas de las poliolefinas recicladas en una prensa calefactora Carver modelo 2112-2, 400 °C, 5 °C; 500 psi, 7 000 psi a 200 °C y 5 000 psi por 30 segundos. Estas muestras fueron analizadas en un espectrofotómetro infrarrojo por transformadas de Fourier Perkin Elmer modelo Espectrum One a una resolución de 4 cm^{-1} con 16 barridos en el rango comprendido entre 450 y 4 000 cm^{-1}.

2.3.4. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA CON POLIOLEFINAS RECICLADAS Y EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN Y DISTRIBUCIÓN

Se realizó la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 de acuerdo a lo descrito en la sección 2.2.1. Para su evaluación de dispersión y distribución se siguió lo explicado en el numeral 2.2.2.

2.3.5. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL FUNDIDO

Se determinó la densidad en el estado fundido de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 en una plastómero de extrusión marca CEAST modelo 6942.000 1 °C, 200 ° C a una temperatura de 210 °C y con una carga de 2,16 kN.

Se recogieron cinco porciones las mismas que se pesaron en una balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200, 200 g, 0,0001 g. Los cálculos se muestran en el Anexo VII.

2.3.6. ANÁLISIS TÉRMICO POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

Esta parte del estudio tuvo que ser efectuada en otro calorímetro diferencial de barrido debido a un daño en el sensor del equipo usado a lo largo de la presente investigación. Cabe recalcar que el calorímetro empleado en los análisis térmicos de las poliolefinas recicladas posee similares características que el usado hasta el momento.

Estos análisis se realizaron una sola vez en un calorímetro Netzsch modelo DSC F1 204 Phoenix, 700 °C, 0,1 °C únicamente con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. Por esta razón no se determinaron temperaturas de cristalización de las poliolefinas recicladas ni de su mezcla debido alto costo de este insumo.

Las transiciones térmicas de primer orden en las poliolefinas recicladas se realizaron de acuerdo a lo descrito en el numeral 2.1.4.2. El estudio térmico de la mezcla PEAD/PP 95/5 se efectuó conforme a lo explicado en las secciones 2.2.3.1 y 2.2.3.2.

2.4. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE MEZCLADO CON POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS

2.4.1. INGENIERÍA CONCEPTUAL

2.4.1.1. Capacidad

La capacidad de la planta se estimó con base en la clasificación de residuos sólidos y porcentajes de reciclaje de plástico del DMQ (EMASEO, 2010, p. 2).

Esta producción se calculó para la elaboración de la mezcla con materiales comerciales y reciclados.

2.4.1.2. Localización de la planta

Se seleccionó la ubicación de la planta con base en los criterios descritos por Sinnott (2001) que se mencionan a continuación (p. 891):

- Posible mercado
- Cercanía a los proveedores de materia prima
- Facilidades de transporte
- Disponibilidad de servicios básicos
- Disponibilidad de mano de obra
- Regulaciones municipales

2.4.2. INGENIERÍA BÁSICA

2.4.2.1. Balances de masa, energía y elaboración de los diagramas de proceso

El balance de masa se efectuó para las dos mezclas a partir de:

- La producción establecida para la planta.
- Una jornada laboral de 8 horas al día.
- La concentración de la mezcla con mejores características de miscibilidad.

El balance de energía se llevó a cabo en los procesos de enfriamiento y secado tanto para la mezcla reciclada como para la comercial. A continuación se especifican los criterios empleados en este balance.

- Enfriamiento

Se consideró que la materia prima ingresa a temperatura ambiente al extrusor.

Se estimó la temperatura de salida de la mezcla fundida de acuerdo a los perfiles recomendados para el procesamiento de PEAD y PP (Naranjo, Noriega, Sierra y Sanz, 2002, pp. 53, 57).

La cantidad de agua requerida para el enfriamiento se calculó mediante un balance de energía entre la masa de mezcla fundida y el agua refrigerada por sistema Chiller. La capacidad calórica de la mezcla se estimó a partir del Cp de sus componentes.

- Secado

Se efectuó un balance de energía entre el agua adherida a la mezcla extruida con perfil tipo “tallarín” luego del enfriamiento y el aire suministrado por un soplador.

Con este procedimiento se determinó el coeficiente de convección del aire. Posteriormente se calculó el número adimensional Nusselt de acuerdo al criterio “Flujo alrededor o a través de un cilindro (Cilindro vertical en flujo cruzado)”. Se usó la ecuación de Zhukauskas descrita por Incropera y DeWitt (1999) con la que se obtuvo el número de Reynolds y luego el caudal de aire necesario para el

secado (p. 370). Las propiedades del aire fueron evaluadas a temperatura ambiente excepto el número de Prandtl (Pr_s) que se estimó a la temperatura de pared.

La cantidad de agua adherida al perfil tipo “tallarín” se calculó mediante el registro inicial del peso de tres segmentos de PEAD extruido de 5 cm de longitud en una balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200, 200 g, 0,0001 g. Posteriormente éstos se sumergieron en un recipiente con agua por aproximadamente un minuto. Luego se los retiró y se registró su peso con lo que se obtuvo el porcentaje de agua debido a que no se estipula un valor bibliográfico similar.

Conjuntamente a los balances de masa y energía se realizaron el BFD y PFD de acuerdo a los convenios y formatos recomendados para la elaboración de diagramas de bloque y de flujo del proceso (Bailie, Bhattacharyya, Shaeiwitz, Turton y Whiting, 2012, pp. 6, 8 – 14).

2.4.2.2. Consideraciones de selección y dimensionamiento de equipos

- Extrusor

Se estimó el diámetro del husillo con el método de prueba y error en la ecuación descrita por Rosato y Rosato (1989) que toma en cuenta la producción de la planta, la gravedad específica en el estado fundido de las mezclas, altura de los filetes en la zona de dosificación y el número de revoluciones por minuto del husillo (p. 160).

De acuerdo a los datos de densidad en el estado fundido del PEAD y PP reportados por Zambrano (2008), se calculó la gravedad específica de la mezcla comercial (pp. 147, 148). La gravedad específica de la mezcla reciclada se determinó en la sección 2.3.5. Ambos parámetros se relacionaron con la densidad del agua a 4 °C.

Conforme a los criterios establecidos por Naranjo et al., (2002), se determinaron las relaciones de compresión (Rc) y longitud/diámetro (L/D) (p. 6).

De acuerdo a los criterios estipulados por Morales (2010) se calcularon la geometría del husillo y la potencia mínima del extrusor (pp. 245 – 247).

Estos parámetros sirvieron para la selección de la extrusora.

- Bandeja de enfriamiento

A partir de la cantidad de agua necesaria para el enfriamiento de la mezcla se seleccionó una bandeja de mayor volumen para evitar desbordamientos y se consideraron las dimensiones generales de este equipo entregadas por el proveedor.

- Soplador

De acuerdo a la cantidad de aire necesaria para el secado del tallarín de la mezcla extruida se escogió un soplador que entregue el caudal requerido en el proceso. Además se modificaron las áreas de salida del aire para obtener una mejor transferencia de calor.

- Otros equipos

Los dosificadores, Chiller, pelletizadora y la máquina de llenado se seleccionaron de acuerdo a su capacidad. Con base en lo especificado por Bailie et al., (2012), se efectuaron las hojas de especificación de todos los equipos de la planta (p. 17).

2.4.2.3. Elaboración del lay out

Para la elaboración de la distribución en planta se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Disposición y espaciamiento entre equipos.
- Flujo de la materia prima, del producto y de los operarios.

- Almacenamiento de materia prima, producto e insumos.

También se realizó un corte lateral a la línea de extrusión y se elaboró un diagrama de recorrido del producto.

2.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DE LA PLANTA DISEÑADA

2.5.1. COSTO DE MATERIA PRIMA

Los costos de las poliolefinas comerciales se estimaron de acuerdo a los precios del mercado internacional (Plastics News, 2013).

Debido a la informalidad en la compra y venta de materiales plásticos reciclados no se obtuvieron datos de fuentes oficiales como el Ministerio del Ambiente o EMASEO, por lo que los costos de la poliolefinas recicladas se estimaron a partir de los precios del mercado local.

2.5.2. COSTOS DE EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES

Los costos de los equipos se obtuvieron de las proformas entregadas por proveedores locales de líneas de extrusión.

Los costos de consumo de agua y energía eléctrica se calcularon a partir de las tarifas establecidas por la EMAAP para zonas industriales y por la Empresa Eléctrica Quito respectivamente.

2.5.3. ESTIMACIÓN DEL COSTO DE PRODUCCIÓN POR UNIDAD

Se consideraron los costos que influyen directamente en la producción, es decir, materia prima, insumos y salario de trabajadores de planta por saco de mezcla de 25 kg producido.

Dichos salarios se calcularon con base en el Código de Trabajo del Ecuador.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ENSAYOS A POLIOLEFINAS COMERCIALES

3.1.1. CONTENIDO DE CENIZAS

En la Tabla 3.1 se presenta el contenido de inorgánicos en las poliolefinas. De acuerdo a la norma ASTM 5630-06 si los valores son menores a 1% se debe reportar en ppm.

Tabla 3.1. Contenido de material inorgánico en las poliolefinas comerciales obtenido con base en la norma ASTM 5630-06

Poliolefina	Contenidos de material inorgánico (ppm)
PEAD	238 ± 11
PEBD Dow	238 ± 9
PEBD Hanwha	318 ± 10
PEBD Lotrene	150 ± 16
PELBD Braskem	210 ± 14
PELBD Dowlex	241 ± 11
PELBD Taisox	219 ± 10
PP	558 ± 19

Se observa que las poliolefinas comerciales poseen un mínimo contenido de inorgánicos que podría deberse a la presencia de estabilizantes agregados a estos materiales después de la polimerización para de prevenir procesos oxidativos.

El polipropileno presenta un contenido de 558 ppm que constituye el valor más alto comparado con el resto de los polietilenos. Este comportamiento, según Gächter y Müller (1993), puede ser provocado por los estabilizantes que se adicionan en mayor proporción a este polímero ya que es mucho más sensible a la oxidación que el polietileno (p. 62).

Existen rangos de concentración de estabilizantes de origen inorgánico usados generalmente en estos materiales los mismos que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Rangos referenciales de estabilizantes para poliolefinas comerciales

Poliolefina	Rango de estabilizantes (ppm)
PEAD	200 – 1 000
PEBD	100 - 700
PELBD	100 - 300
PP	500 – 3 000

(Gätchter y Müller, 1993, pp. 50, 51, 64 – 69)

Si se comparan los datos de las Tablas 3.1 y 3.2 se puede apreciar que los valores obtenidos en la determinación experimental del contenido de inorgánicos se encuentran dentro de los rangos respectivos para cada material.

En definitiva este contenido inorgánico es mínimo como para afectar las interacciones de las cadenas de las poliolefinas en las mezclas.

3.1.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

En la Tabla 3.3 se muestran las densidades de las poliolefinas con las respectivas temperaturas.

Los ensayos se realizaron inicialmente a 18 °C y conforme trascurrió el análisis la temperatura ambiente se elevó a 19 °C. Los valores de densidad de la Tabla 3.3 se encuentran corregidos con respecto a la temperatura.

Tabla 3.3. Densidades experimentales de las poliolefinas comerciales obtenidas con base en la norma ASTM D 792-08 con alcohol etílico absoluto como líquido de inmersión

Poliolefina	Densidad (g/cm^3)	Temperatura (°C)
PEAD	0,9406 ± 0,0041	19,0
PEBD Dow	0,9206 ± 0,0005	18,5
PEBD Hanwha	0,9208 ± 0,0004	18,0
PEBD Lotrene	0,9199 ± 0,0004	18,5
PELBD Braskem	0,9163 ± 0,0005	18,0
PELBD Dowlex	0,9193 ± 0,0004	18,0
PELBD Taisox	0,9192 ± 0,0003	19,0
PP	0,8894 ± 0,0029	19,0

Con respecto a la densidad, todas las poliolefinas presentan valores dentro de los rangos establecidos en bibliografía que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Rango bibliográfico de densidades de poliolefinas

Poliolefina	Densidad (g/cm^3)
PEAD	0,920-0,990
PEBD	0,910-0,935
PELBD	0,912-0,930
PP	0,850-0,910

(Mark, 1999, pp. 500, 510, 522, 782)

La densidad es uno de los parámetros característicos que definen a las poliolefinas, particularmente a los polietilenos. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la estructura de sus cadenas. Experimentalmente se obtuvo una densidad para el PEAD de 0,9406 ± 0,0041 g/cm^3 que constituye, como su nombre lo indica, el mayor valor entre las poliolefinas. Según Peacock (2000), este comportamiento se debe a su linealidad estructural y escasas ramificaciones lo que permite que este material sea altamente cristalino (p. 2).

Las densidades del PEBD y el PELBD de la Tabla 3.3 son menores comparadas con la del PEAD debido principalmente a los distintos grados de ramificaciones

que presentan estos dos materiales lo que reduce sus capacidades de cristalización.

Para el polipropileno se obtuvo un valor de 0,8894 g/cm^3. Este dato constituye el menor de las poliolefinas estudiadas. De acuerdo con Calhoun y Peacock (2006), este comportamiento podría originarse por el grupo metilo del PP que reduce su cristalinidad (p. 286).

3.1.3. ANÁLISIS TÉRMICO POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

3.1.3.1. Calibración y validación

Con base en el análisis de los termogramas de los estándares y al procedimiento de calibración del calorímetro diferencial de barrido Netzsch modelo DSC F1 204 Phoenix, que se adjunta en el Anexo V, se obtuvieron las curvas de calibración que se muestran a continuación.

- Temperatura

En la Figura 3.1 se aprecia la curva de calibración de temperatura. Los puntos de la curva pertenecen a la temperatura inicio u “onset” experimental de cada estándar en el eje de las abscisas con respecto a la temperatura inicio bibliográfica menos la temperatura inicio experimental en el eje de las ordenadas.

De acuerdo a los datos calculados en la Tabla A V.3, ningún valor supera la diferencia máxima permisible que es de ± 3 °C por lo que esta curva es válida.

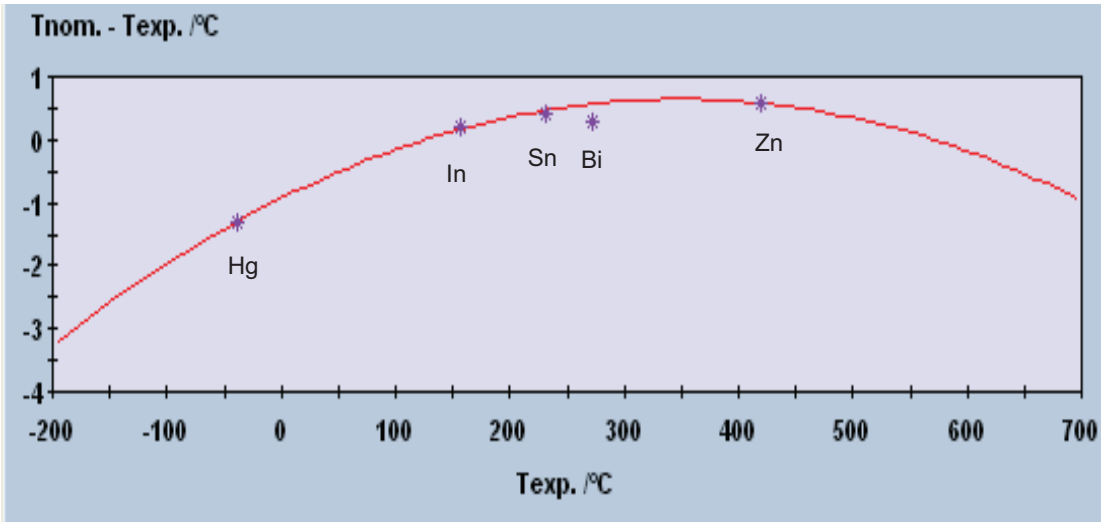


Figura 3.1. Curva de calibración para temperatura del DSC Netzsch F1 204 Phoenix para un rango de trabajo entre -200 y 700 °C con 20 ml/min de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min

- Entalpía

En la Figura 3.2 se aprecia la curva de calibración de entalpía. Los puntos pertenecen a la temperatura inicio u "onset" experimental de cada estándar en el eje de las abscisas con respecto a la sensibilidad calculada en el eje de las ordenadas.

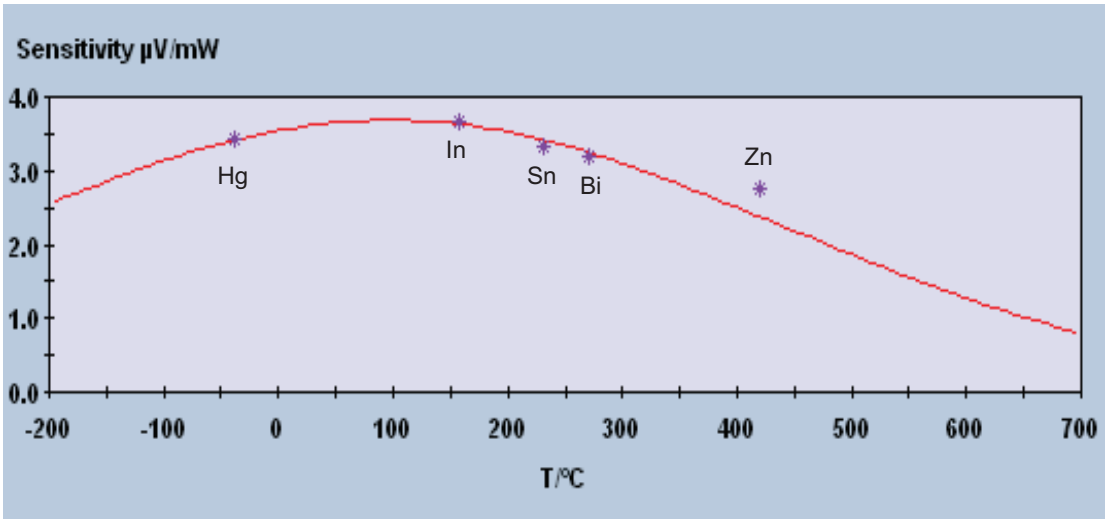


Figura 3.2. Curva de calibración para entalpía del DSC Netzsch F1 204 Phoenix para un rango de trabajo entre -200 y 300°C con 20 ml/min de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min

Para aceptar la curva de calibración de entalpía como válida, la desviación máxima permisible entre la sensibilidad calculada y experimental debe ser máximo ± 3%. De acuerdo a los valores reportados en la Tabla A V.5, todos los estándares cumplen con este parámetro excepto el Zn cuya desviación es del 15,22%. El rango de temperatura de trabajo para las poliolefinas tiene un máximo de 200 °C, y en este rango la curva de calibración se ajusta perfectamente, es decir la desviación del Zn no afecta la entalpía de fusión de los materiales en estudio.

No se excluyó este punto, correspondiente al Zn, debido a que el programa de calibración del equipo no permite realizar este procedimiento con menos de cinco estándares. No se usaron otros estándares por disponibilidad de los mismos.

- Validación

Para validar la calibración se efectuaron ensayos con tres estándares: Hg, In y Sn. Luego de analizar sus termogramas, los mismos que también se adjuntan en el Anexo V, se obtuvieron los resultados de las Tablas 3.5 y 3.6 donde se los compara con los valores teóricos.

Tabla 3.5. Determinación del error entre temperatura calculada y teórica

Estándar	Temperatura Calculada (°C)	Temperatura Teórica [a] (°C)	% Error
Hg	-39,10	-38,80	0,77
In	156,60	156,40	0,13
Sn	232,73	231,50	0,53

[a](Netzsch, 2010, p. 25)

Tabla 3.6. Determinación del error entre la entalpía de fusión calculada y teórica

Estándar	Entalpía de Fusión Calculada (J/g)	Entalpía de Fusión [a] Teórica (J/g)	% Error
Hg	11,41	11,40	0,12
In	29,31	28,60	2,49
Sn	59,68	60,50	1,36

[a](Netzsch, 2010, p. 25)

Se observa que el porcentaje de error para la temperatura no supera el 1% y para la entalpía no sobrepasa el 3%. Aunque en el Manual de Calibración del DSC no se establecen valores máximos de error, se puede verificar que los valores experimentales obtenidos son muy cercanos a los teóricos por lo que el calorímetro se encuentra calibrado en el rango de trabajo para poliolefinas.

3.1.3.2. Determinación de la temperatura y entalpía de fusión

Se presentan a continuación los termogramas pertenecientes al segundo calentamiento a 10 °C/min de las poliolefinas vírgenes. Las curvas en color azul, rojo y verde corresponden a la primera, segunda y tercera mediciones respectivamente. La temperatura de fusión constituye el valor del máximo pico mientras que la entalpía es equivalente al área endotérmica tal como se explicó en el numeral 1.2.1.6. Las masas de las muestras así como la de las celdas usadas en este análisis térmico se indican en la Tabla A VIII.1. Se muestran además, los valores bibliográficos de la temperatura de fusión de las poliolefinas en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Rangos de temperatura de fusión para las poliolefinas

Poliolefina	Temperatura de fusión (°C)
PEAD	130-140
PEBD	105-115
PELBD	120-130
PP	165-176

(Ehrenstein et al., 2004, p. 15; Naranjo et al., 2008, p. 105)

En la Figura 3.3 se muestra el termograma del PEAD con las tres repeticiones efectuadas. En todas ellas se observa un único pico de fusión que corresponde al valor de 134,4 ± 0,7 °C, dato que se encuentra dentro del rango especificado en la Tabla 3.7. Existe además un proceso de fusión bien definido bajo la línea base

debido a las escasas ramificaciones que posee este material. Se determinó que la energía asociada a este proceso fue de 193,4 ± 2,0 J/g.

Este valor constituye el más alto dentro de las poliolefinas. Según Zambrano (2008), esto se debe a que el PEAD es un material altamente cristalino y por lo tanto necesita mayor energía para fundir comparado con el PP, PEBD y PELBD (p. 79).

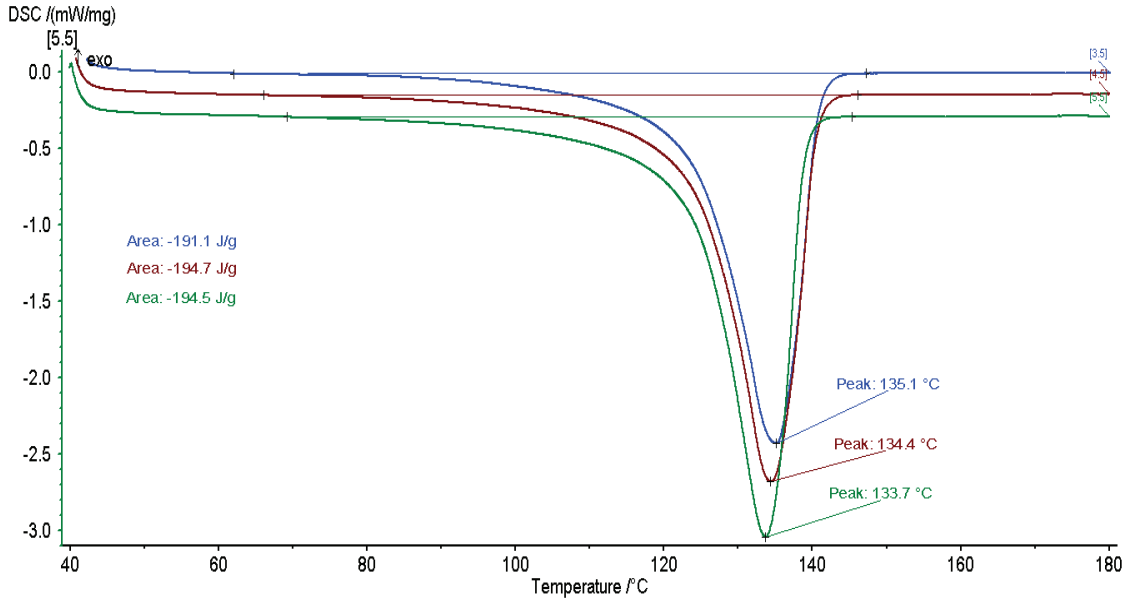


Figura 3.3. Termograma de las tres repeticiones del PEAD correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

Al analizar el termograma del PEBD Dow de la Figura 3.4, se pueden apreciar picos anchos en las tres repeticiones sin la presencia de estabilidad de la línea base antes de la fusión. Según Menczel y Prime (2009), la fusión en el PEBD y el PELBD, se da como un proceso gradual que puede iniciar a temperaturas cercanas a la ambiental (p. 103). Este comportamiento podría deberse al alto grado de ramificaciones que exhiben los polietilenos de baja densidad y la diferencia en el tamaño de los cristales en su estructura. Esto no ocurre con el PEAD debido a la linealidad de sus cadenas y la mayor uniformidad en el tamaño de sus cristales comparada con el PEBD.

El PEBD Dow presenta una temperatura y entalpía de fusión de 110,6 ± 0,2 °C y 133,6 ± 6,4 J/g respectivamente. Estos valores son menores comparados con los del PEAD debido al contenido sustancial de ramificaciones que presenta este material. Además la temperatura de fusión obtenida para este polietileno también se encuentra dentro del rango bibliográfico.

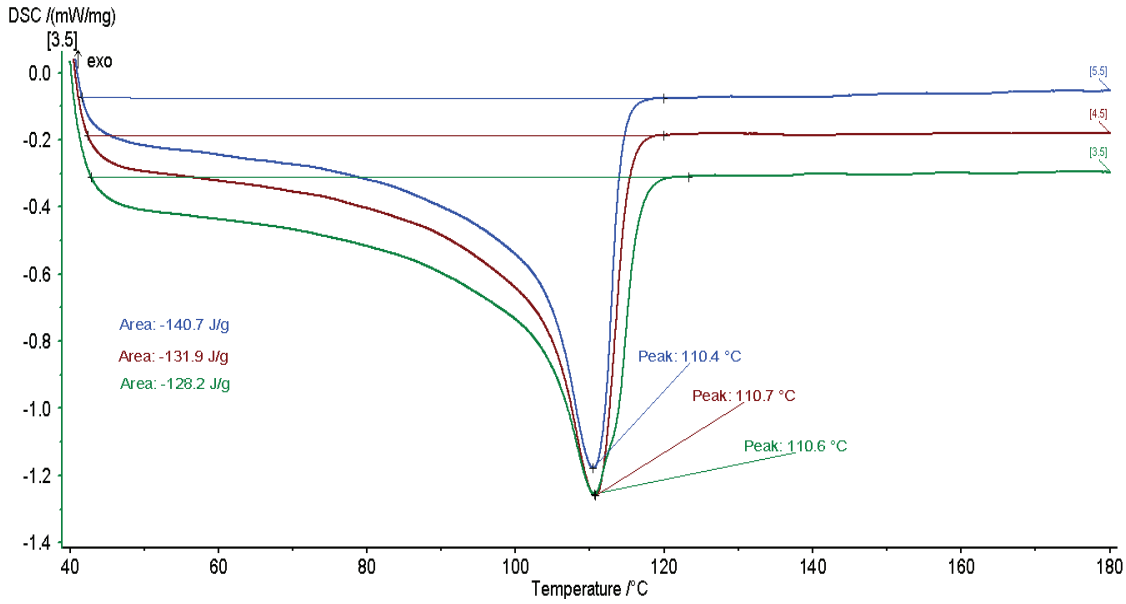


Figura 3.4. Termograma de las tres repeticiones del PEBD Dow correspondientes al segundo calentamiento a 10°C/min

En la Figura 3.5, que pertenece al termograma del PEBD Hanwha, se observa un solo pico en las tres repeticiones efectuadas y se advierte también la falta de estabilidad de la línea base antes de la fusión. Se aprecia que el pico en el PEBD Hanwha es más amplio comparado con el PEBD Dow de la Figura 3.4. De acuerdo a Taipe (2008), este comportamiento podría deberse a los distintos tamaños de los cristales entre ambos polietilenos que deforman a la curva (p. 70).

Además el PEBD Hanwha presenta una entalpía y temperatura de fusión de 126,7 ± 1,8 J/g y 112,2 ± 0,5 °C respectivamente. Este último valor está dentro del límite bibliográfico de la Tabla 3.7.

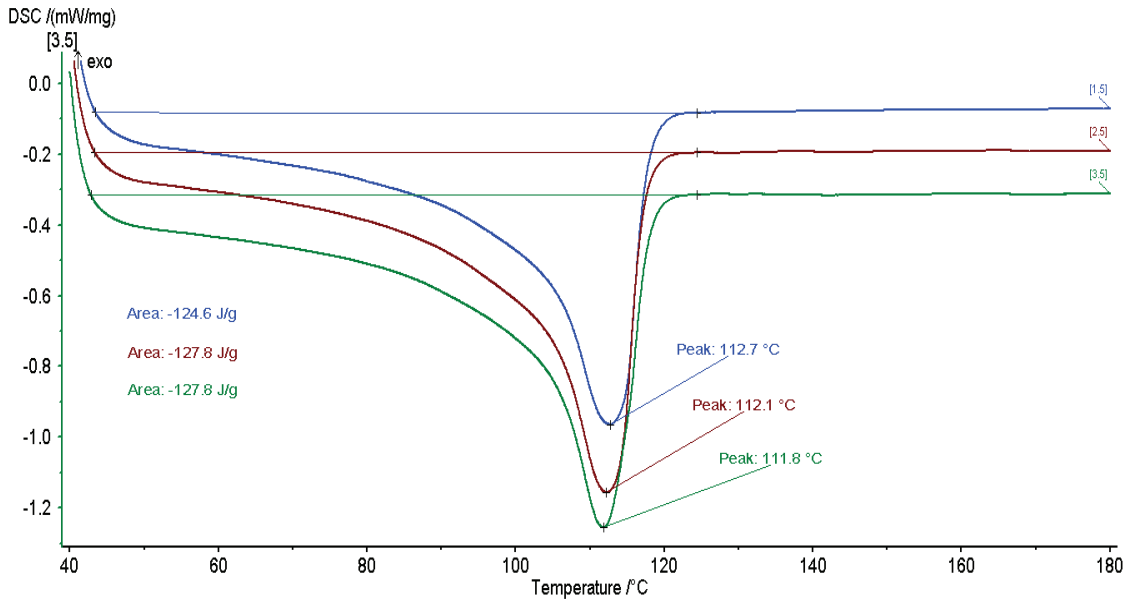


Figura 3.5. Termograma de las tres repeticiones del PEBD Hanwha correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

De igual manera, en el termograma del PEBD Lotrene de la Figura 3.6, se aprecia que no existe estabilidad de la línea base antes del proceso de fusión en las tres repeticiones y que sus picos son holgados. Este material exhibe una temperatura de fusión de 111,9 ± 0,8 °C, valor que está dentro del rango bibliográfico. La entalpía determinada para este polietileno fue de 132,4 ± 4,5 J/g.

A pesar de que se trata de un mismo material, se observa que los tres PEBD analizados experimentan variaciones en cuanto a la entalpía principalmente el PEBD Hanwha que exhibe la menor energía asociada al proceso de fusión. Este comportamiento puede deberse a que en su estructura existen cristales de menor tamaño por lo que se requiere menor cantidad de energía para la fusión comparados con los PEBD Dow y Lotrene

Por otra parte, los PEBD exhiben temperaturas de fusión menores que las del PEAD. Este comportamiento podría deberse, según Kyu y Nwabunma (2008), al distinto contenido de ramificaciones que poseen estos materiales que tiene un efecto importante en su cristalinidad y ocasiona el descenso de la temperatura de fusión comparada con el PEAD (p. 28).

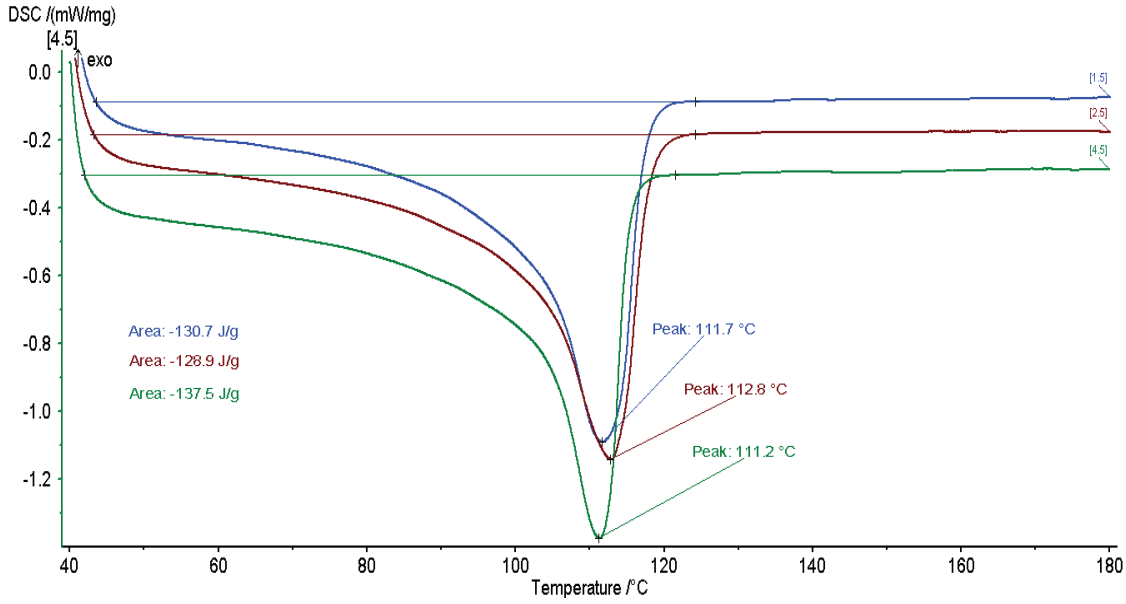


Figura 3.6. Termograma de las tres repeticiones del PEBD Lotrene correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

Para el PELBD Braskem, cuyo termograma se aprecia en la Figura 3.7, se observa un único pico en las tres repeticiones efectuadas y se advierte también la falta de estabilidad de la línea base antes de la fusión.

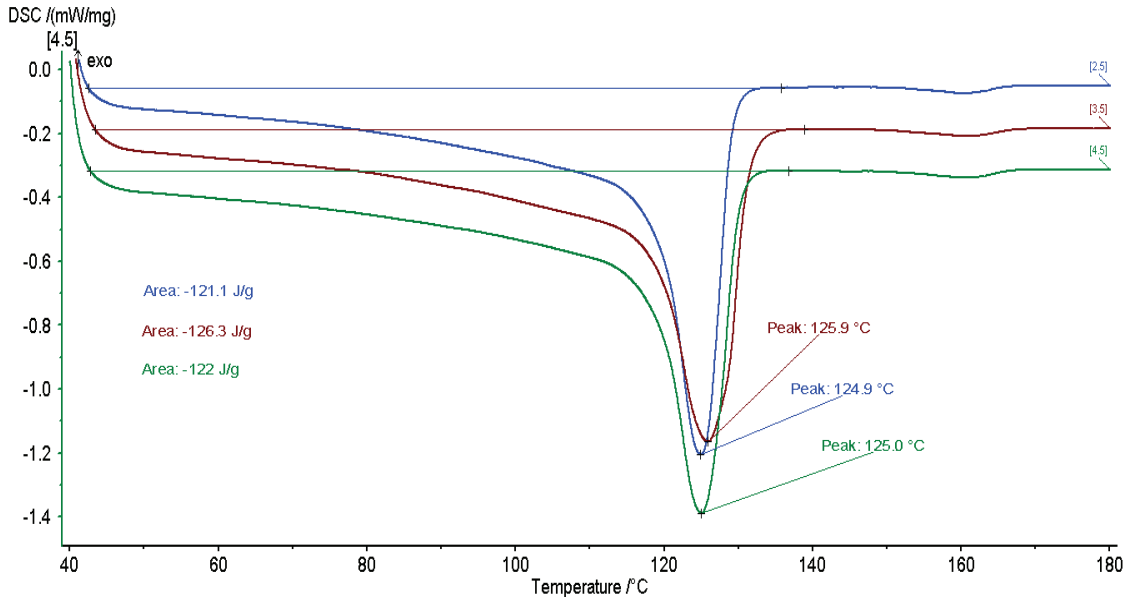


Figura 3.7. Termograma de las tres repeticiones del PELBD Braskem correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

Este comportamiento es común en los PEBD y PELBD por la razón explicada anteriormente. Presenta además una temperatura y entalpía de fusión 125,3 ± 0,6 °C y 123,1 ± 2,8 J/g respectivamente. La temperatura se encuentra dentro del rango bibliográfico para PELBD.

En la Figura 3.8 se aprecia el termograma correspondiente al PELBD Dowlex. Se observan dos picos, uno claramente definido que constituye la temperatura de fusión a 121,6 ± 0,4 °C y otro de menor intensidad a 111,5 ± 0,7 °C. La aparición de dichos picos puede deberse a las ramificaciones en su estructura o la presencia de dos tipos de comonómeros. Esta puede ser una razón para que la temperatura de fusión de este material disminuya con respecto a la del PELBD Braskem. La temperatura determinada está dentro del rango bibliográfico de la Tabla 3.7. El PELBD Dowlex presenta además una energía asociada al proceso de fusión de 129,5 ± 0,8 J/g.

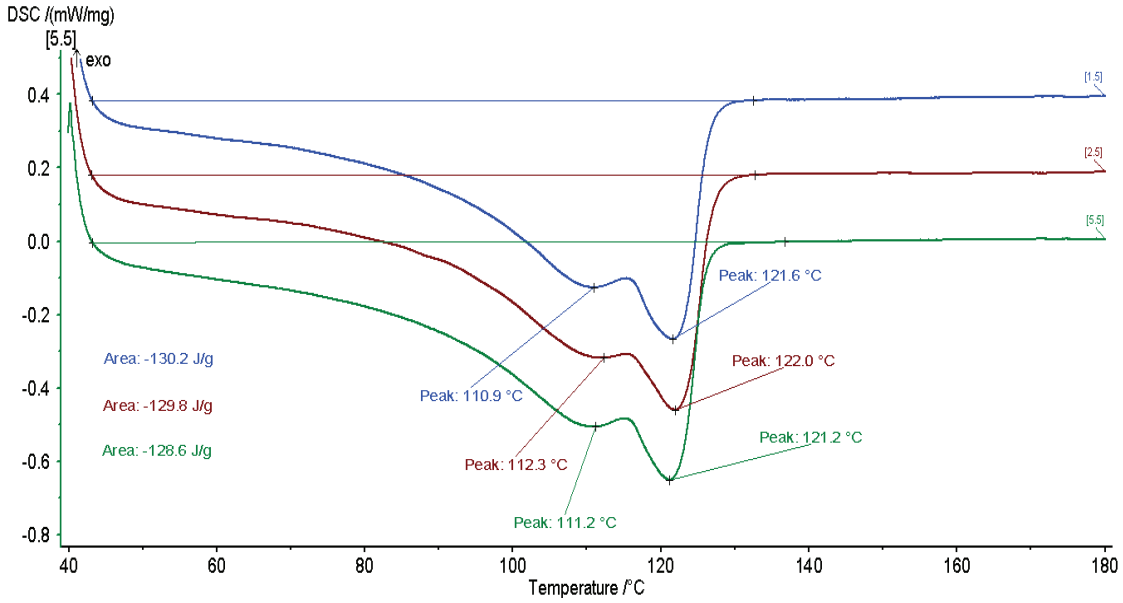


Figura 3.8. Termograma de las tres repeticiones del PELBD Dowlex correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

En el termograma de la Figura 3.9, perteneciente al PELBD Taisox, se observa un pico definido y un hombro a 124,3 ± 0,2 °C y 112,6 ± 0,5 °C respectivamente. De

igual manera que en el caso anterior, este comportamiento puede originarse por las ramificaciones o por la presencia de comonómeros en su estructura.

Este material exhibe una entalpía de fusión de 125,6 ± 0,9 J/g. Las variaciones de esta propiedad, en los tres PELBD analizados, también podría deberse al distinto tamaño de los cristales en cada uno de ellos. La temperatura de fusión del PELBD es mayor que la del PEBD debido a que este material exhibe menor grado de ramificaciones en sus cadenas lo que lo hace más cristalino.

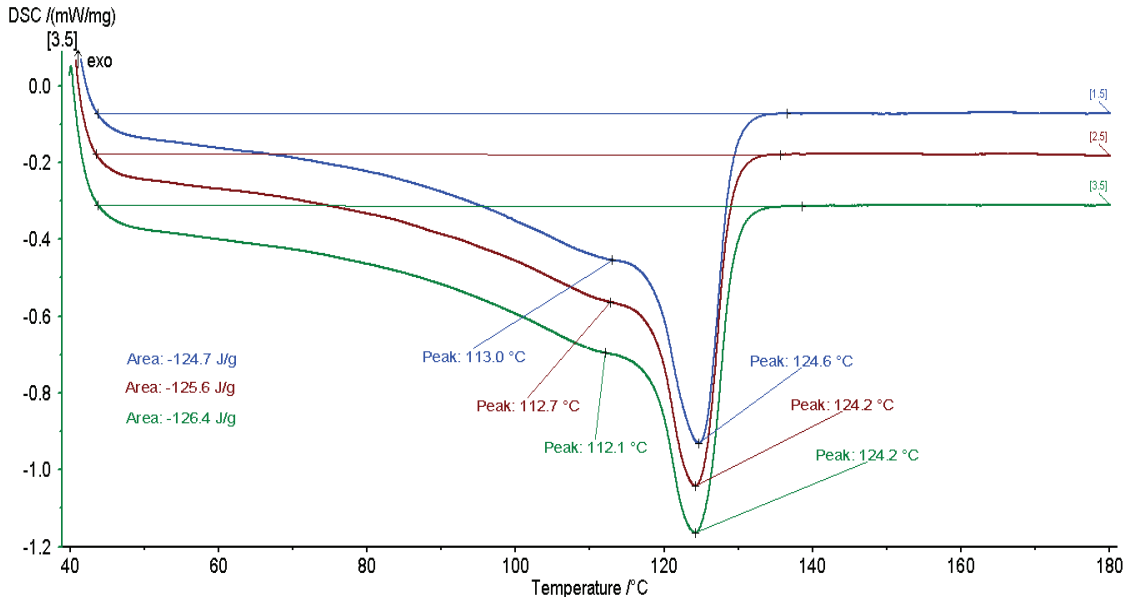


Figura 3.9. Termograma de las tres repeticiones del PELBD Taisox correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

Por último, en la Figura 3.10 se muestra el termograma del PP. Se aprecia estabilidad de la línea base antes y después de la fusión así como las presencias de un pico claramente definido a 165,6 ± 1,1 °C y la de un pequeño hombro a 148,2 ± 0,5 °C. Esto sugiere que el PP presenta estructura de una copolímero ramdom o en bloque. Su temperatura de fusión constituye la mayor de todas las poliolefinas estudiadas. Según Kyu y Nwabunma (2008), el grupo metilo colgante en la cadena principal del PP produce este efecto (p. 28).

Presenta además una entalpía de fusión de 108,1 ± 2,6 J/g, en otras palabras, el PP es la poliolefina que menor energía necesita para fundir sus fracciones cristalinas.

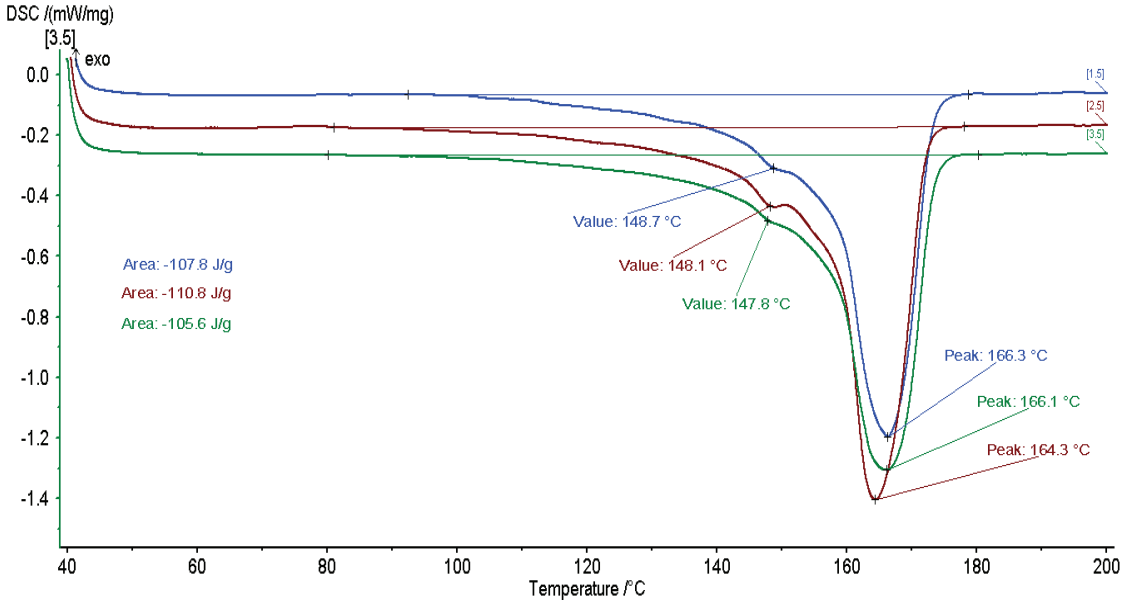


Figura 3.10. Termograma de las tres repeticiones del PP correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

En la Tabla 3.8 se resumen la temperatura y entalpía de fusión de todas las poliolefinas analizadas.

Tabla 3.8. Valores resumidos correspondientes a la temperatura y entalpía de fusión de las poliolefinas vírgenes obtenidas a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min

Poliolefina	Temperatura de fusión (°C)	Entalpía de fusión (J/g)
PEAD	134,4 ± 0,7	193,4 ± 2,0
PEBD Dow	110,6 ± 0,2	133,6 ± 6,4
PEBD Hanwha	112,2 ± 0,5	126,7 ± 1,8
PEBD Lotrene	111,9 ± 0,8	132,4 ± 4,5
PELBD Braskem	125,3 ± 0,6	123,1 ± 2,8
PELBD Dowlex	121,6 ± 0,4	129,5 ± 0,8
PELBD Taisox	124,3 ± 0,2	125,6 ± 0,9
PP	165,6 ± 1,1	108,1 ± 2,6

Se puede apreciar que todas las temperaturas de fusión determinadas experimentalmente se encuentran dentro del rango bibliográfico de la Tabla 3.7.

Se observa también que el PEAD y el PP exhiben la mayor y menor entalpía de fusión respectivamente. La diferencia en cuanto al grado de ramificaciones y al tamaño de los cristales en las estructuras de los tres PEBD analizados ocasionan los distintos valores de entalpía de fusión a pesar de que se trata de un mismo tipo de polietileno. De igual manera ocurre para el PELBD.

3.1.3.3. Determinación de la temperatura de cristalización

En esta sección se presentan los termogramas de las poliolefinas comerciales correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min. De igual manera, las curvas en color azul, rojo y verde pertenecen a la primera, segunda y tercera repeticiones respectivamente. La temperatura de cristalización se calcula como el máximo pico exotérmico presente en el termograma. Las masas de las celdas así como de la de las muestras se adjuntan en la Tabla A VIII.1.

En la Figura 3.11 se aprecia que la temperatura de cristalización para el PEAD corresponde a 113,6 ± 0,3 °C cuyo valor constituye el mayor de todas las poliolefinas comerciales en estudio. Este comportamiento podría deberse a que el PEAD presenta escasas ramificaciones en sus cadenas lo que ocasiona que los cristalitos se formen a temperaturas más altas que en el resto de poliolefinas.

Se observa además la presencia de un pico que sugiere una sola nucleación, la cual podría originarse por la presencia de agentes externos como el material inorgánico presente. Esto es corroborado por Peacock (2000), quien establece que la nucleación heterogénea predomina el proceso de cristalización en los polietilenos (p. 85).

No se reportan valores bibliográficos de esta transición en polímeros pero de acuerdo a un estudio realizado por Arnal, Sánchez y Müller (2001), la temperatura de cristalización que obtuvieron para el PEAD fue de 115,0 °C a 10 °C/min (p.

6879). Si se compara este dato con el obtenido experimentalmente en la Figura 3.11, se observa que no existe una diferencia significativa entre estos dos valores obtenidos a la misma velocidad de enfriamiento.

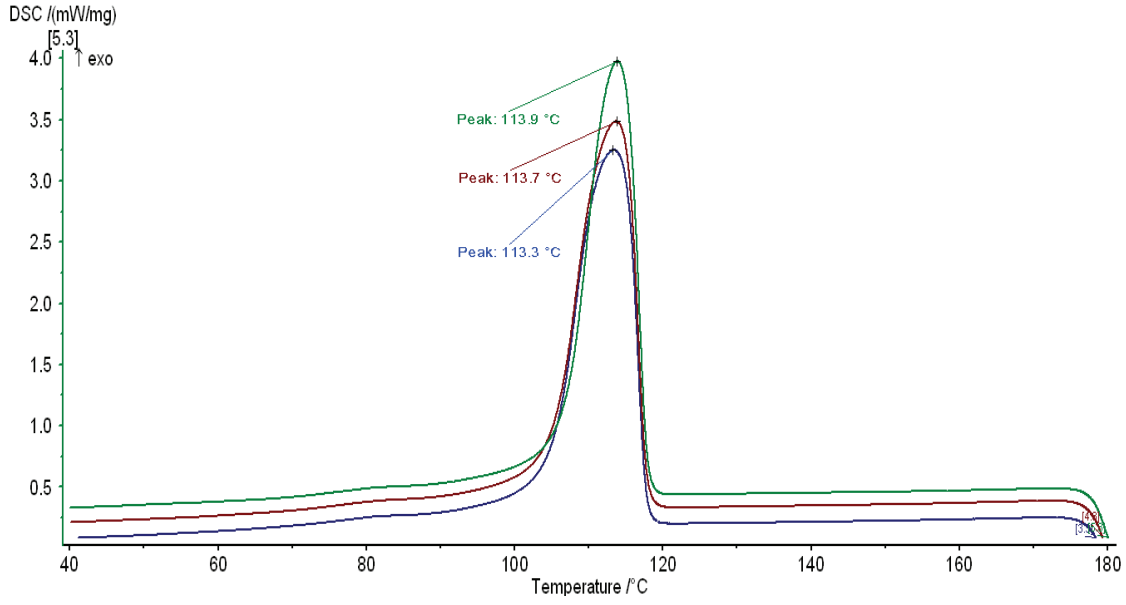


Figura 3.11. Termograma del PEAD correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

En el termograma de la Figura 3.12, perteneciente al PEBD Dow, se pueden observar, en las tres repeticiones efectuadas, un pico claramente definido a 93,8 ± 0,3 °C, que constituye la temperatura de cristalización, y un hombro a 60,0 ± 0,6 °C. La presencia de estas dos transiciones advierte que en el material se pudieron originar dos nucleaciones. Esta explicación es corroborada por Menczel y Prime (2009), quienes establecen que se pueden producir dos picos de cristalización cuando ocurren dos nucleaciones simultaneas en un polímero (p. 87).

Prasad (1998), determinó en su estudio que la temperatura de cristalización del PEBD fue de 102,0 °C a una velocidad de enfriamiento de 5 °C/min (p. 1717). El valor obtenido para el PEBD Dow es menor debido a que se obtuvo a 10 °C/min. Según Calhoun y Peacock (2006), la temperatura a la que se forma los cristales disminuye con el incremento de la velocidad de enfriamiento (p. 122).

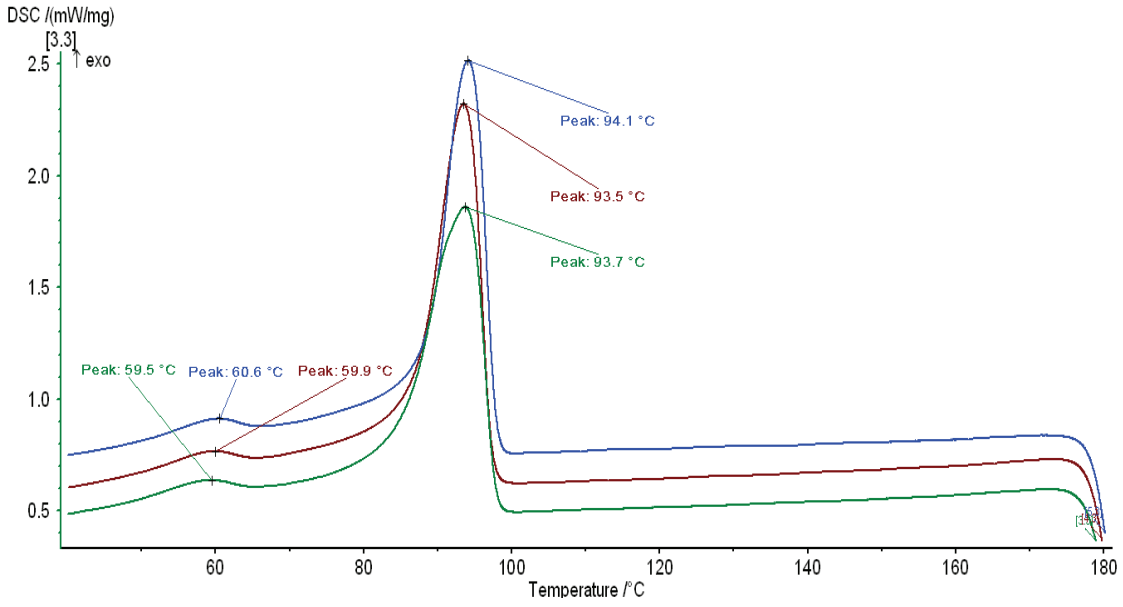


Figura 3.12. Termograma del PEBD Dow correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

En el termograma de la Figura 3.13, concerniente al PEBD Hanwha, se observan también un pico bien definido a 94,0 ± 0,6 °C y un hombro a 59,5 ± 0,4 °C. Estas transiciones sugieren que se originaron dos nucleaciones. Se observa además que no existe una diferencia importante entre los valores obtenidos para el PEBD Dow y Hawnha. Esto indica que los núcleos de los cristales se formaron aproximadamente a la misma temperatura en ambos materiales.

Asimismo, se observan dos transiciones en el termograma del PEBD Lotrene de la Figura 3.14. Una claramente definida que constituye la temperatura de cristalización a 93,7 ± 0,9 °C y otra, a manera de hombro, a 59,8 ± 0,1 °C. Este comportamiento también se debe a dos nucleaciones ocurridas en el material. Entre los valores de temperatura obtenidos para los PEBD Dow, Hanwha y Lotrene se observan mínimas diferencias. Con respecto al PEAD, la temperatura de cristalización de los PEBD descendió aproximadamente 19 °C. Esto podría corresponder a las distintas nucleaciones producidas en cada polietileno y a la diferencia en cuanto al contenido de ramificaciones en las cadenas de cada material que afectan la cristalización.

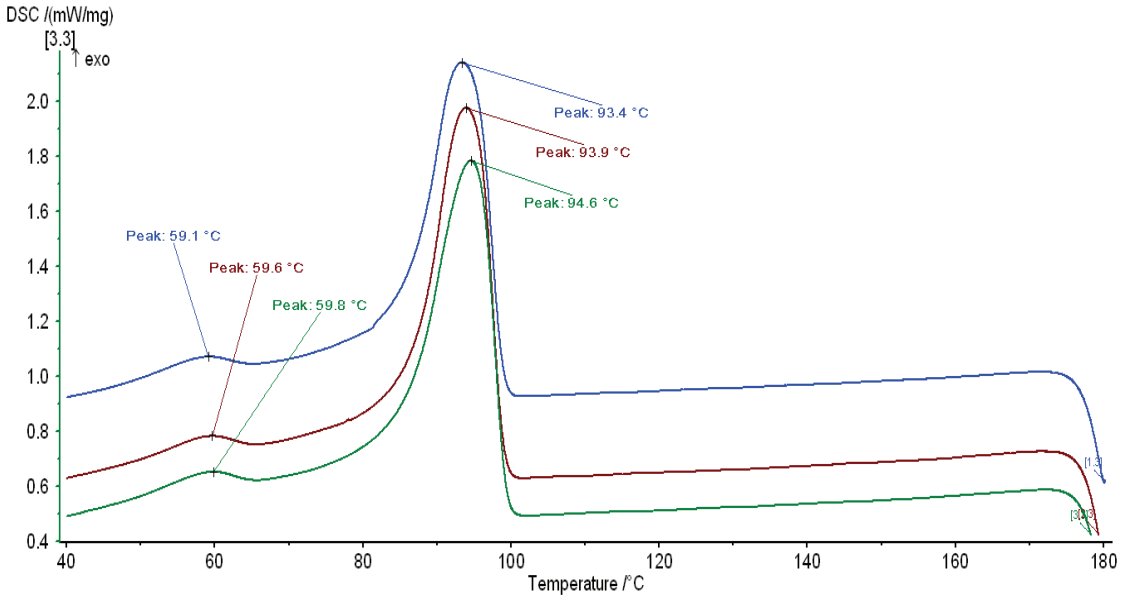


Figura 3.13. Termograma del PEBD Hanwha correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

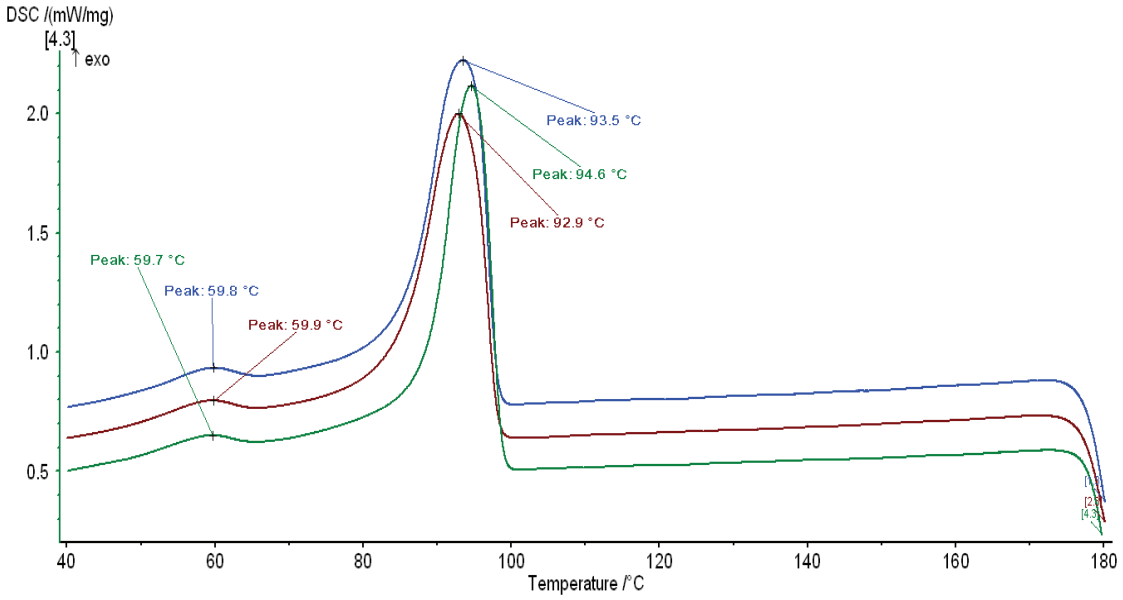


Figura 3.14. Termograma del PEBD Lotrene correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

El termograma del primer enfriamiento del PELBD Braskem se encuentra en la Figura 3.15. En este caso también se aprecian un pico evidente a 106,5 ± 0,6 °C y un pequeño hombro a 66,9 ± 2,0 °C. Estas transiciones podrían originarse, de igual manera que en los PEBD, por dos nucleaciones de sus cristales. Se observa además que la intensidad del hombro disminuye considerablemente comparada con la de los PEBD.

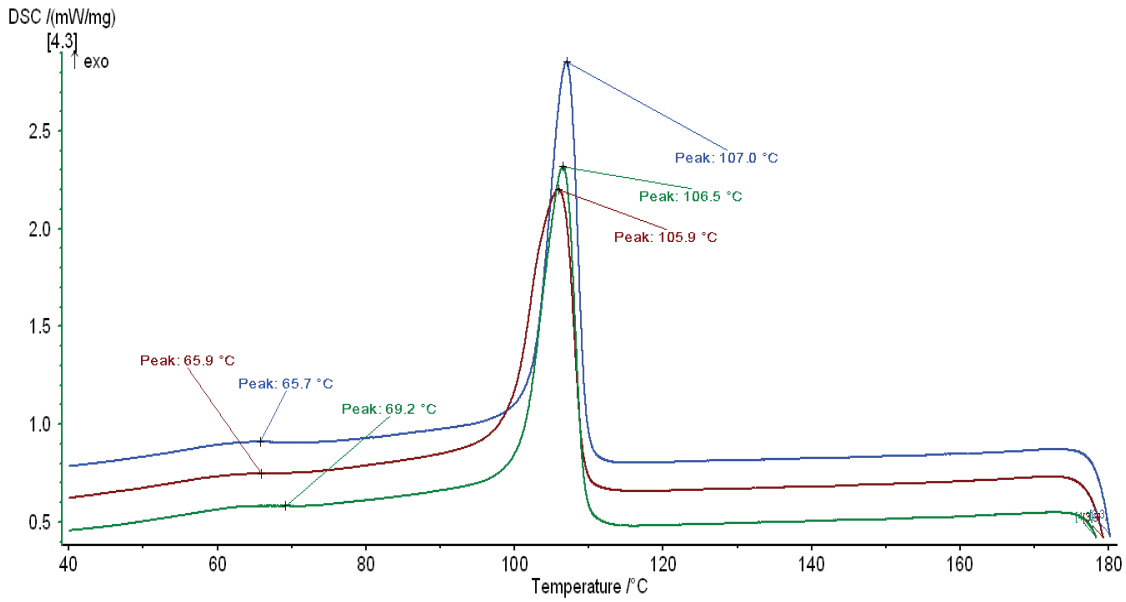


Figura 3.15. Termograma del PELBD Braskem correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

En la Figura 3.16 se muestra el termograma del PELBD Dowlex donde se aprecian un hombro a 62,9 ± 0,4 °C y un pico definido 101,2 ± 0,4 °C que se podrían producir por dos nucleaciones de sus cristales. En el termograma de la Figura 3.8 se determinó la presencia de dos picos en este material debido a las ramificaciones. Esto podría producir el descenso en su temperatura de cristalización con respecto a la PELBD Braskem debido a la mayor dificultad de sus cadenas para formar cristales.

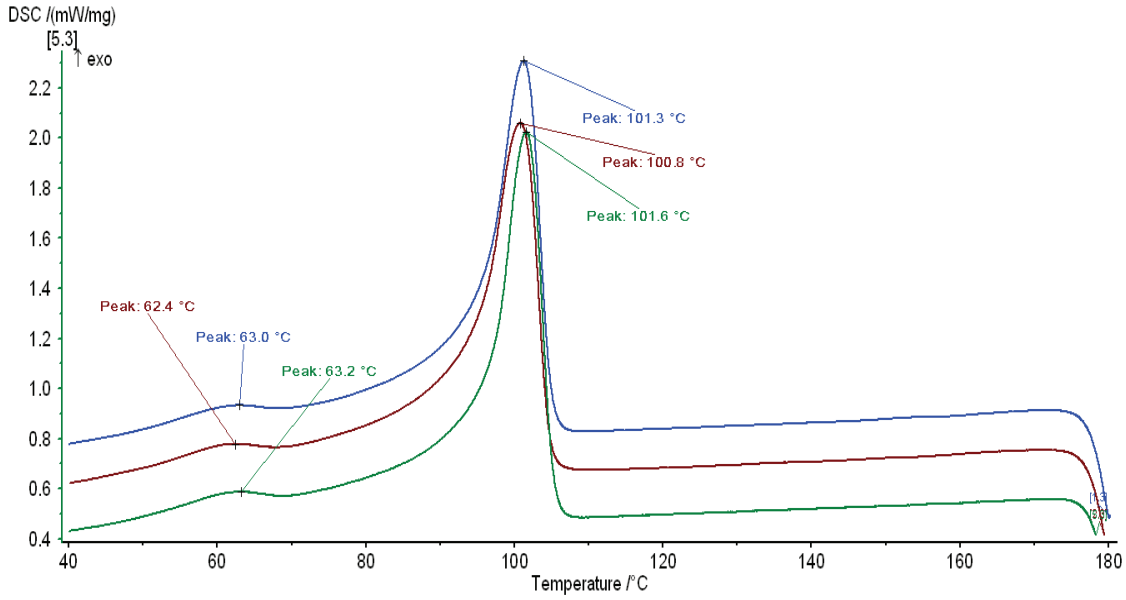


Figura 3.16. Termograma del PELBD Dowlex correspondientes al primer enfriamiento a 10°C/min

En el termograma correspondiente al PELBD Taisox de la Figura 3.17 también se observan un hombro a 63,5 ± 0,3 °C y un pico notorio a 105,3 ± 0,2 °C que de igual manera se pueden producir por dos nucleaciones. La temperatura de cristalización del PELBD Taisox es mayor que la del PELBD Dowlex debido a la diferencia en el contenido de ramificaciones en su estructura que facilitan la formación de cristales en el PELBD Taisox.

Si se comparan las temperaturas de cristalización entre los PEBD y los PELBD, se observa que estos últimos presentan valores mayores debido al contenido reducido de ramificaciones en sus cadenas lo que les permite cristalizar a temperaturas más altas que las del PEBD.

Se observa en el termograma de la Figura 3.18 la presencia de un solo pico exotérmico que corresponde a la temperatura de cristalización del PP a 112,2 ± 0,7 °C lo que indica que se produjo una nucleación. Según Avramov, Celli y Zanotto (2003), este material tiene una nucleación heterogénea predominante a temperaturas de cristalización menores a 138 °C (p. 397).

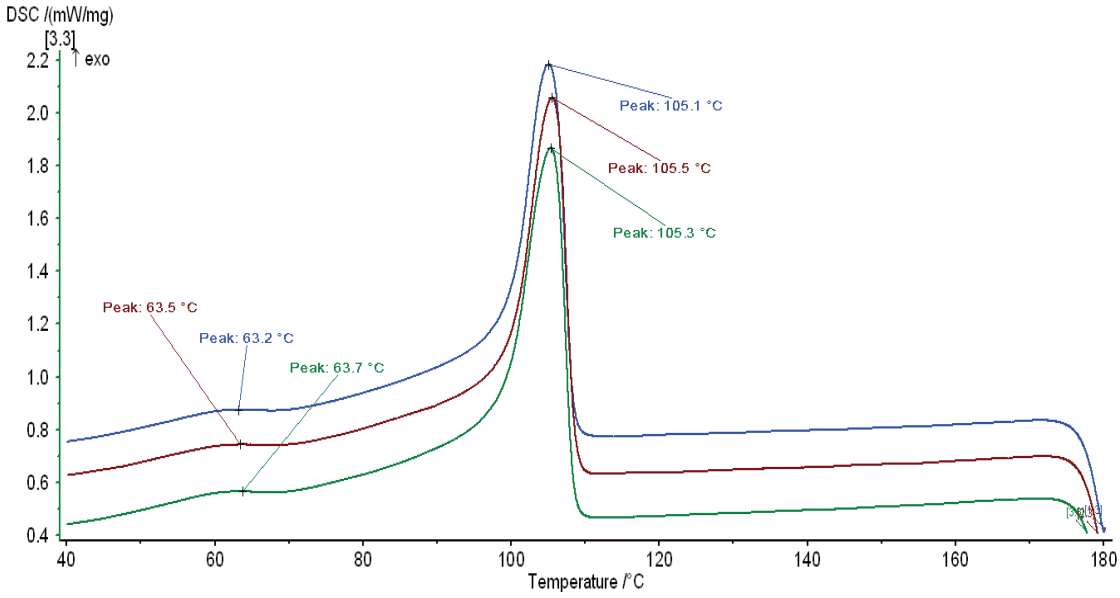


Figura 3.17. Termograma del PELBD Taisox correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

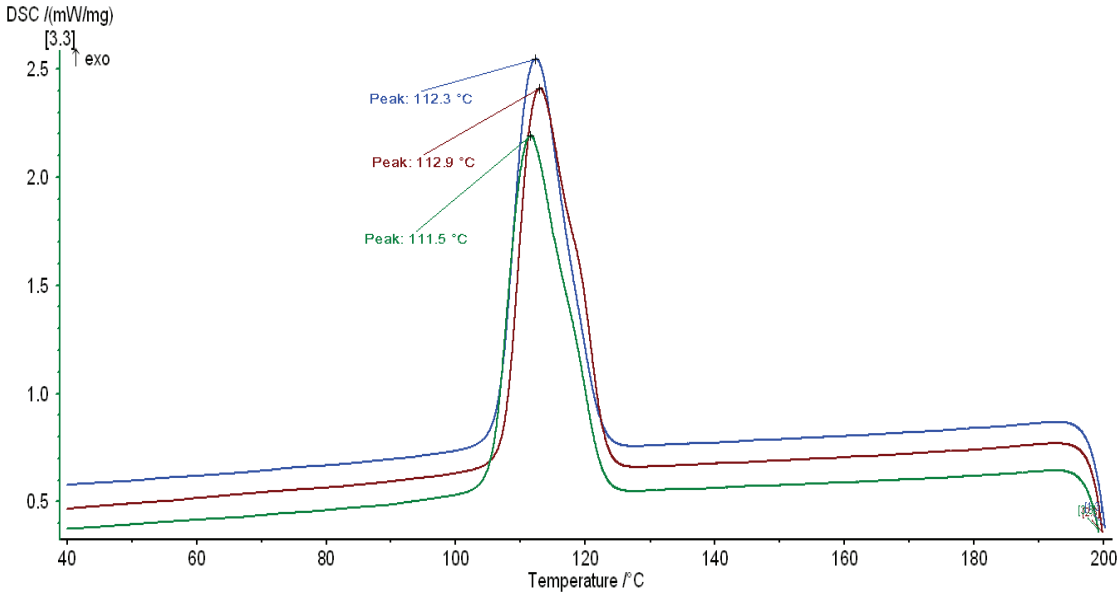


Figura 3.18. Termograma del PP correspondientes al primer enfriamiento a 10 °C/min

Para un velocidad de enfriamiento de 10 °C/min, Menczel y Prime (2009), sugieren que la temperatura de cristalización de un PP biorientado se encuentra en un rango entre 107 y 127 °C (pp. 86). Claro está que estos valores no son definitivos y pueden variar debido a la dependencia de esta transición con el tipo de nucleación y con la velocidad de enfriamiento.

En la Tabla 3.9 se sintetizan los valores de la temperatura de cristalización de las poliolefinas en estudio.

Tabla 3.9. Valores resumidos correspondientes a la temperatura de cristalización de las poliolefinas vírgenes obtenidas a una velocidad de enfriamiento de 10 °C/min

Poliolefina	Temperatura de cristalización (°C)
PEAD	113,6 ± 0,3
PEBD Dow	93,8 ± 0,3
PEBD Hanwha	94,0 ± 0,6
PEBD Lotrene	93,7 ± 0,2
PELBD Braskem	106,5 ± 0,6
PELBD Dowlex	101,2 ± 0,4
PELBD Taisox	105,3 ± 0,2
PP	112,2 ± 0,7

3.1.3.4. Determinación de la temperatura de transición vítrea

A continuación se presentan los termogramas donde se determinan las temperaturas de transición vítrea de las poliolefinas que formaron parte de las mezclas estudiadas en el presente trabajo. La selección de los polietilenos para el sistema PEBD/PELBD se la hizo con base en reogramas y termogramas que se muestras más adelante en las secciones 3.2.1.1 y 3.2.3.1. De este análisis se eligieron los PEBD Hanwha y PELBD Braskem. Para el PP se realizaron tres repeticiones ya que se utilizó un intracooler como sistema de enfriamiento. Este no es el caso de los polietilenos, para los cuales se efectuó una sola determinación debido a que para el enfriamiento se usó nitrógeno líquido que

constituyó un insumo costoso dentro de la investigación. Las masas de las muestras así como la de las celdas usadas en este ensayo se encuentran en la Tabla A VIII.2.

Debido a que esta transición en los materiales semicristalinos se presenta como una variación mínima y casi imperceptible de la capacidad calórica, se utilizó la primera derivada para facilitar el análisis. Se presentan también valores bibliográficos de temperaturas de transición vítrea para las poliolefinas estudiadas en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Rangos de temperatura de transición vítrea para poliolefinas

Poliolefina	Temperatura de transición vítrea (°C)
PEAD	-130 a -80
PEBD	-120 a -70
PELBD	-120 a -70
PP	-10 a 0

(Naranjo et al., 2008, p. 105)

En la Figura 3.19 se aprecia el análisis de la temperatura de transición vítrea del PEAD cuyo valor fue de -125,4 °C. El mínimo de la primera derivada, que corresponde a la curva entrecortada, en este caso coincide con la transición en estudio. Según Menczel y Prime (2009), este pico puede o no, tener el mismo valor de la transición vítrea en materiales semicristalinos (p. 69).

Si se compara el valor de esta temperatura obtenido para el PEAD con el dato bibliográfico de la Tabla 3.10, se puede observar que se encuentra dentro del rango.

El PEAD presenta la menor temperatura de transición vítrea entre las poliolefinas estudiadas. Este comportamiento podría atribuirse, según Krevelen y Nijenhuis (2009), a que las regiones cristalinas del PEAD perturban a las zonas amorfas lo que provoca una disminución en la movilidad de las cadenas y consecuentemente en la T_g. Además este material presenta la menor fracción amorfa en su estructura debido a la linealidad de sus cadenas (p. 33).

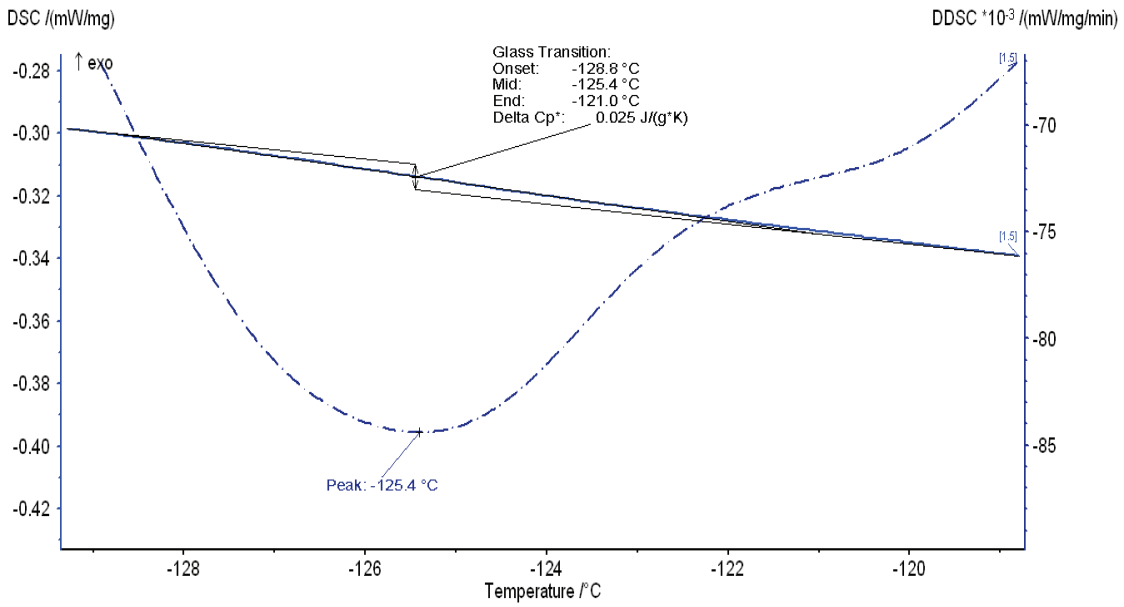


Figura 3.19. Termograma del PEAD correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo

El análisis de la transición vítrea para el PEBD Hanwha se encuentra en la Figura 3.20. El valor determinado para esta temperatura fue de -106,3 °C dato que también se localiza entre el rango bibliográfico de la Tabla 3.10. El pico de la primera derivada dista de la transición vítrea en 0,1 °C.

Se observa además que la curva del termograma presenta mayor ruido que en el PEAD. Esto dificultó la determinación especialmente en la selección de los límites. La temperatura de transición vítrea del PEBD Hanwha difiere en 19 °C con respecto al PEAD. Esto podría deberse al mayor contenido de ramificaciones largas del PEBD que ocasiona una mayor fase amorfa en su estructura.

En la Figura 3.21 se presenta el termograma donde se analizó la temperatura de transición vítrea para el PELBD Braskem. El valor determinado fue de -99,1 °C, dato que se encuentra dentro del rango especificado en la Tabla 3.10. De igual manera que en el caso anterior, el pico de la primera derivada dista en 0,1 °C de la transición y se observa ruido presente en la curva.

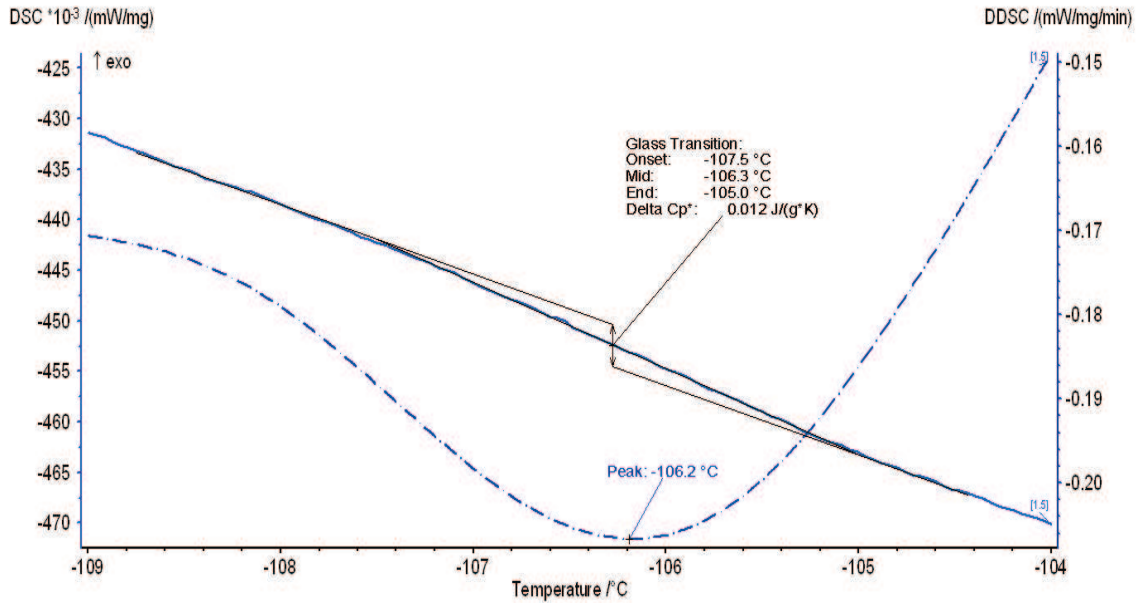


Figura 3.20. Termograma del PEBD Hanwha correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo

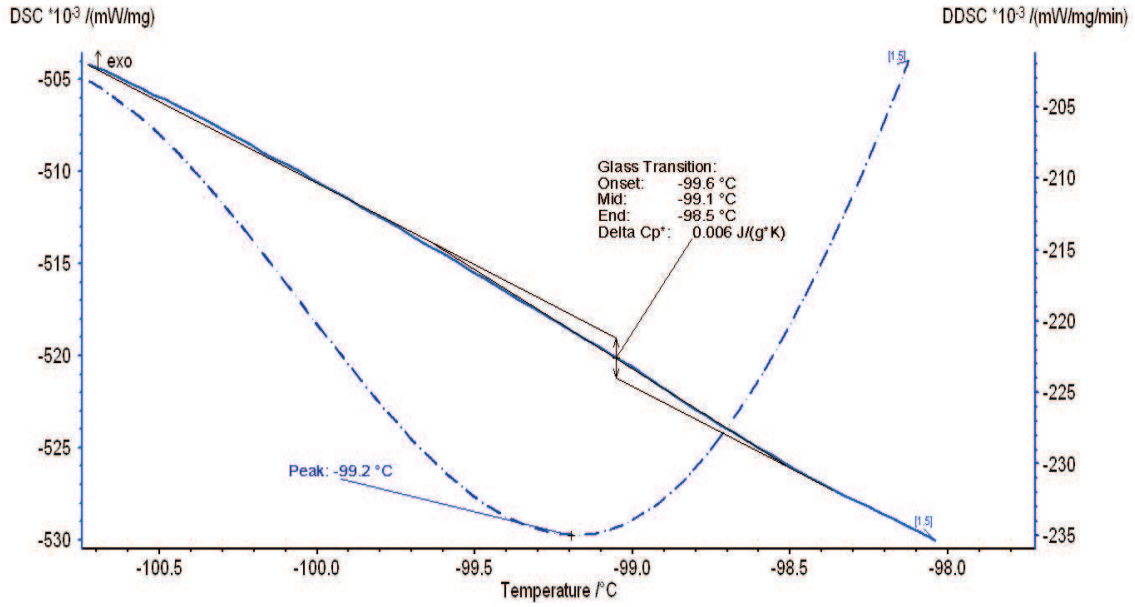


Figura 3.21. Termograma del PELBD Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo

Esta temperatura es la mayor comparada con los polietilenos de alta y baja densidad. Según Menczel y Prime (2009), es complejo describir el comportamiento de la fase amorfa de los polímeros semicristalinos a través de la T_g debido a las mínimas porciones de dicha fase que existen en la estructura de estos materiales (p. 68).

Esto queda demostrado por la complejidad que involucra la determinación de las transiciones vítreas en poliolefinas debido a que se producen a muy bajas temperaturas y se presentan como variaciones mínimas de la capacidad calórica de la muestra.

En la Figuras 3.22, 3.23 y 3.24, se observan las tres determinaciones efectuadas para el PP. La temperatura de transición vítrea para este material fue de -2,7 ± 0,4 °C. Se observa además que el pico de la primera derivada, en los termogramas de las Figuras 3.22 y 3.24, no coincide con la transición. El valor de la temperatura de esta poliolefina está dentro del rango descrito en la Tabla 3.10.

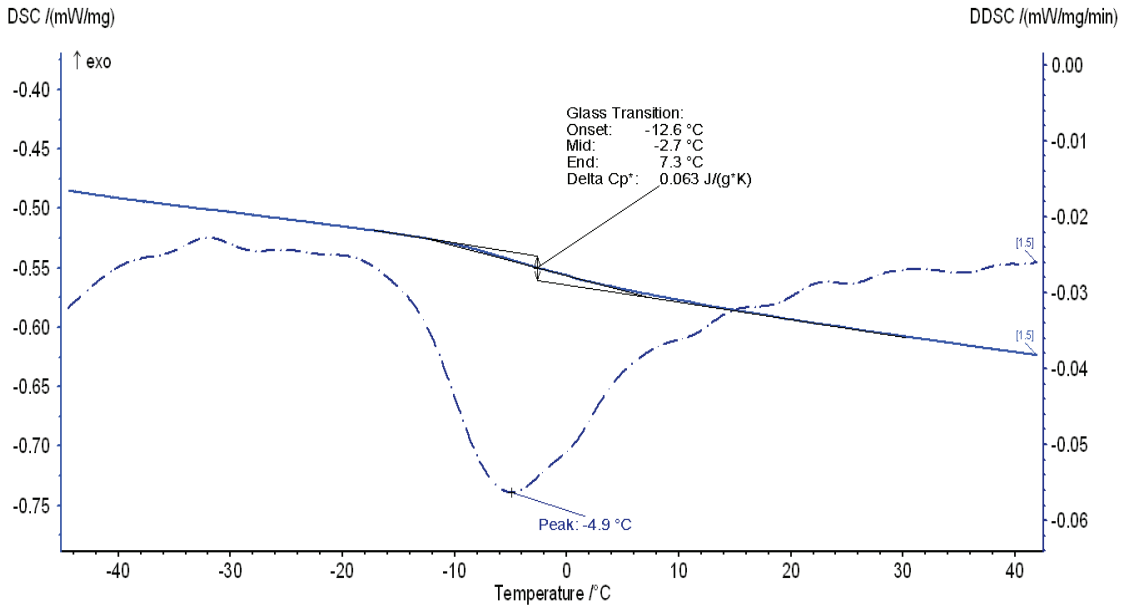


Figura 3.22. Termograma de la primera repetición del PP correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con intracooler como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo

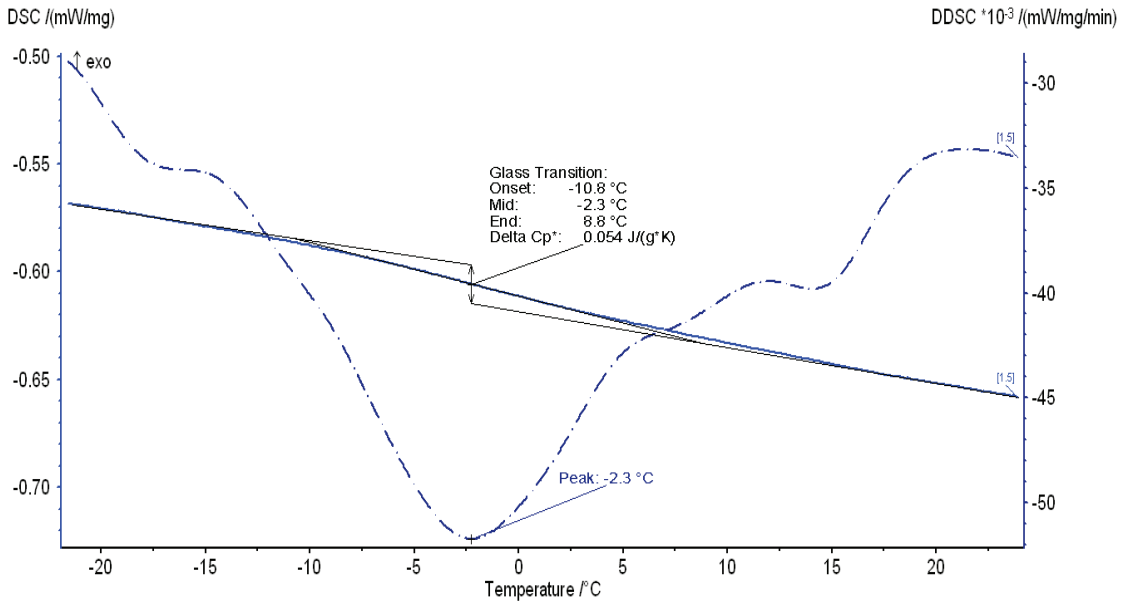


Figura 3.23. Termograma de la segunda repetición del PP correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con intracooler como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo

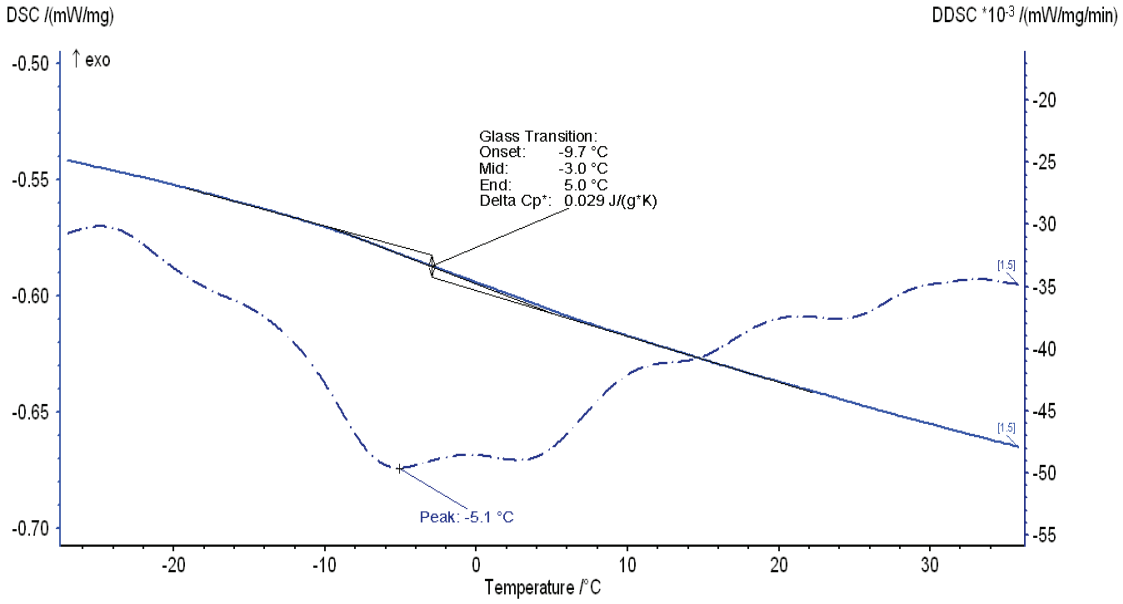


Figura 3.24. Termograma de la tercera repetición del PP correspondiente al segundo calentamiento a 20 °C/min con intracooler como sistema de enfriamiento. La línea entrecortada pertenece a la primera derivada donde se determinó su mínimo

Las curvas pertenecientes a la primera derivada exhiben mayor ruido que las presentes en los termogramas de los polietilenos por lo que fue necesario aplicar un proceso de suavizado. Esto se origina por el cambio en el sistema de enfriamiento de nitrógeno líquido a intracooler con refrigerante.

El valor de esta transición es mucho mayor que el encontrado en los polietilenos. Con base en lo explicado anteriormente por Krevelen y Nijenhuis (2009), el PP exhibe un número menor de regiones cristalinas que las encontradas en el PEAD, por lo que la perturbación a las zonas amorfas disminuiría. Esto puede provocar que el movimiento de las cadenas sea mayor y por lo tanto la T_g del PP se incremente (p. 33).

En la Tabla 3.11 se resumen los valores de la temperatura de transición vítrea para las poliolefinas analizadas.

Tabla 3.11. Valores correspondientes a la temperatura de transición vítrea experimental de las poliolefinas vírgenes obtenidas a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min

Poliolefina	Temperatura de transición vítrea (°C)
PEAD	-125,4 °C
PEBD Hanwha	-106,3 °C
PELBD Braskem	-99,1 °C
PP	-2,7 ± 0,4 °C

3.1.4. ANÁLSIS DE LOS ESPECTROS DE LOS POLIETILENOS LINEALES DE BAJA DENSIDAD

En la Figura 3.25 se aprecia el espectro de los polietilenos lineales de baja densidad Braskem, Dowlex y Taisox de color negro, azul y rojo respectivamente.

Prasad (1999) sugiere que se puede determinar el tipo de comonómero presente en el polietileno lineal de baja densidad de acuerdo a las bandas presentes entre 940 y 760 cm^{-1}, las mismas que se especifican en la Tabla 3.12 (p. 1724).

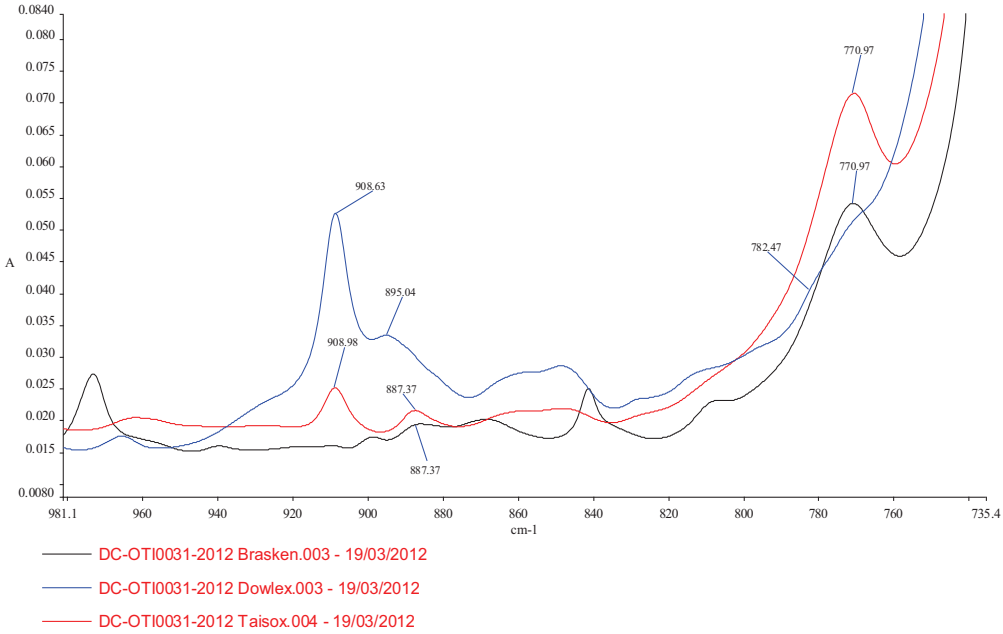


Figura 3.25. Espectro de los polietilenos lineales de baja densidad Braskem, Dowlex y Taisox en el rango entre 981 y 735 cm^{-1}

El espectro de Braskem de la Figura 3.25, presenta dos bandas a 887 y 770 cm^{-1}. Si se analizan los valores de la Tabla 3.12, se observa que las bandas características del comonómero 1-buteno se encuentran presentes en el espectro del PELBD Braskem.

Tabla 3.12. Bandas características de los comonómeros 1-buteno, 1-hexeno y 1-octeno

Comonómero	Bandas (cm^{-1})
1-buteno	908, 887, 770
1-hexeno	908, 895, 834, 780
1-octeno	908 (intensa), 889, 782

(Prasad, 1999, p. 1725)

En el espectro de Dowlex se muestran tres picos a 908, 895 y 782 cm^{-1}. Las bandas a 895 y 782 cm^{-1} indican la presencia de 1-hexeno, mientras que la banda intensa a 908 cm^{-1} corresponde a 1-octeno. Por lo tanto se trata de una mezcla de PELBD 1-hexeno con 1-octeno.

Taisox, de igual manera, exhibe tres picos a 908, 887 y 770 cm^{-1}. Las bandas a 887 y 770 cm^{-1} indican la presencia de 1-buteno, mientras que la banda intensa

de 908 cm^{-1} corresponde a 1-octeno. Esto indica que se trata de una mezcla entre PELBD 1-buteno con 1-octeno.

Con este estudio se demuestra que la presencia de dos picos en los termogramas de las Figuras 3.8 y 3.9, que pertenecen a los PELBD Dowlex y Taisox respectivamente, se deben al contenido de dos tipos distintos de comonómeros en su estructura. Como se mencionó en la sección 2.1.5, este análisis se efectuó únicamente para los PELBD.

3.2. EVALUACIÓN DE LA MISCIBILIDAD DE LAS MEZCLAS ELABORADAS

3.2.1. ANÁLISIS DE REOGRAMAS

3.2.1.1. Selección de polietilenos

En la Figura 3.26 se presenta el reograma correspondiente a las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox. Se observa que la zona de estabilidad para las tres curvas inicia a los 4,5 minutos con un torque constante aproximado de 8,5 Nm. Esto sugiere que a estas condiciones las mezclas se encuentran homogenizadas. Por otra parte, si se analizan los picos de carga del reograma, se puede apreciar que el sistema Hanwha-Dowlex exhibe el mayor torque con un valor de 29,2 Nm. Le sigue la mezcla Hanwha-Taisox con 26,4 Nm y finalmente Hanwha-Braskem con 26,1 Nm.

La diferencia en cuanto a los valores del pico de carga entre los tres sistemas analizados puede deberse a distintos factores como: la rapidez con la que se alimentaron las poliolefinas a la cámara de mezclado del reómetro, la manera como se cerró dicha cámara o la velocidad de giro de los rotores, entre otros. Cabe recalcar que la información valiosa de los reogramas obtenidos se encuentra en la zona de estabilidad y no en los picos de carga.

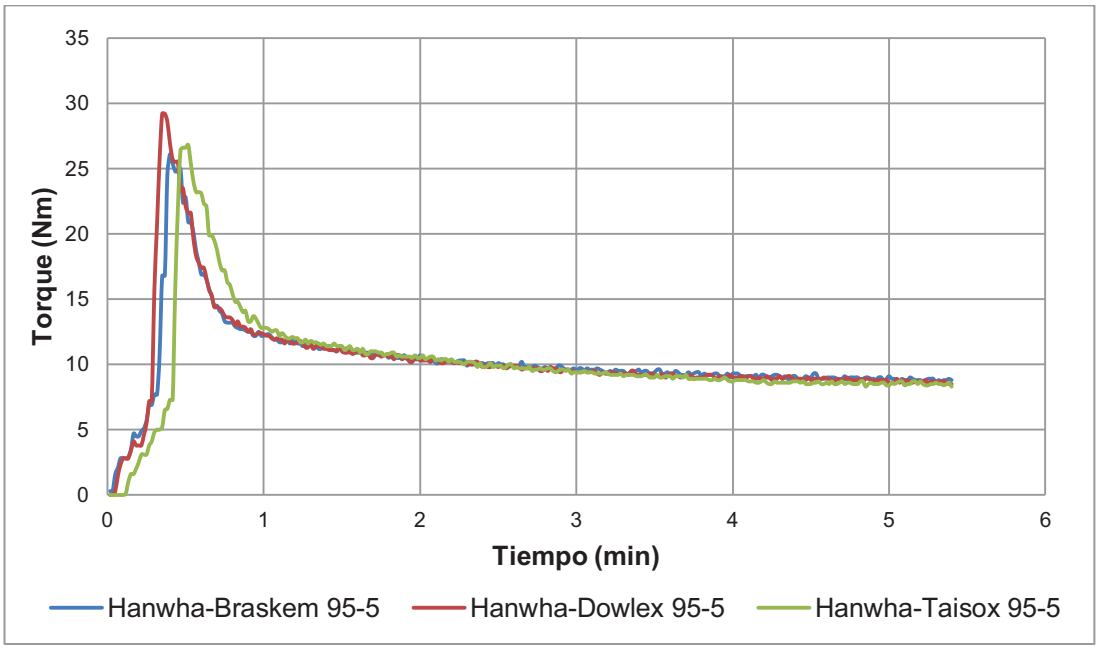


Figura 3.26. Reograma de las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox obtenido a 40 rpm y a 180 °C. Todas las mezclas tienen una concentración de 5% de PELBD

.

En la figura 3.27 se muestra el reograma de las mezclas del PEBD Dow con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox. Se puede observar que la zona de estabilidad también inicia a los 4,5 minutos con un torque constante aproximado de 8,8 Nm. Para el sistema Dow-Braskem el torque máximo es de 31,7 Nm, para Dow-Dowlex de 30,6 Nm y para Dow-Taisox de 31,9 Nm, es decir no se aprecia una diferencia significativa entre el valor de los picos para estos sistemas.

Por otra parte, de acuerdo a la Figura 3.28 donde se exhibe el reograma de las mezclas del PEBD Lotrene con los PELBD Braskem, Dow y Taisox, la zona de estabilidad empieza a los 4 minutos con un torque constante aproximado de 10,6 Nm, valor que constituye el más alto con respecto a los reogramas anteriormente analizados.

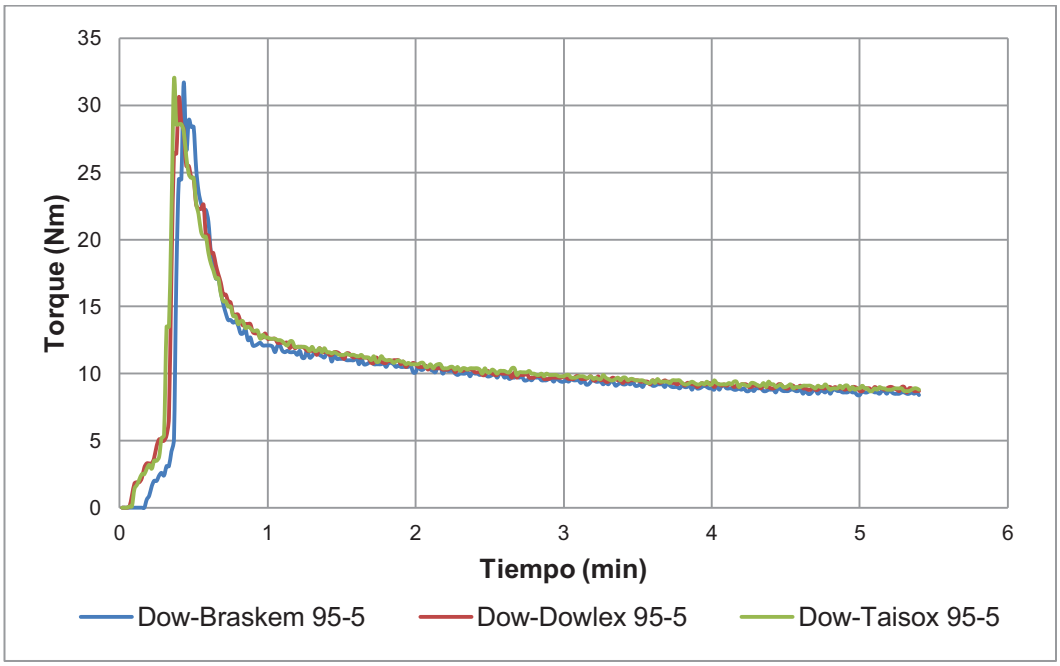


Figura 3.27. Reograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox obtenido a 40 rpm y a 180 °C. Todas las mezclas tienen una concentración de 5% de PELBD

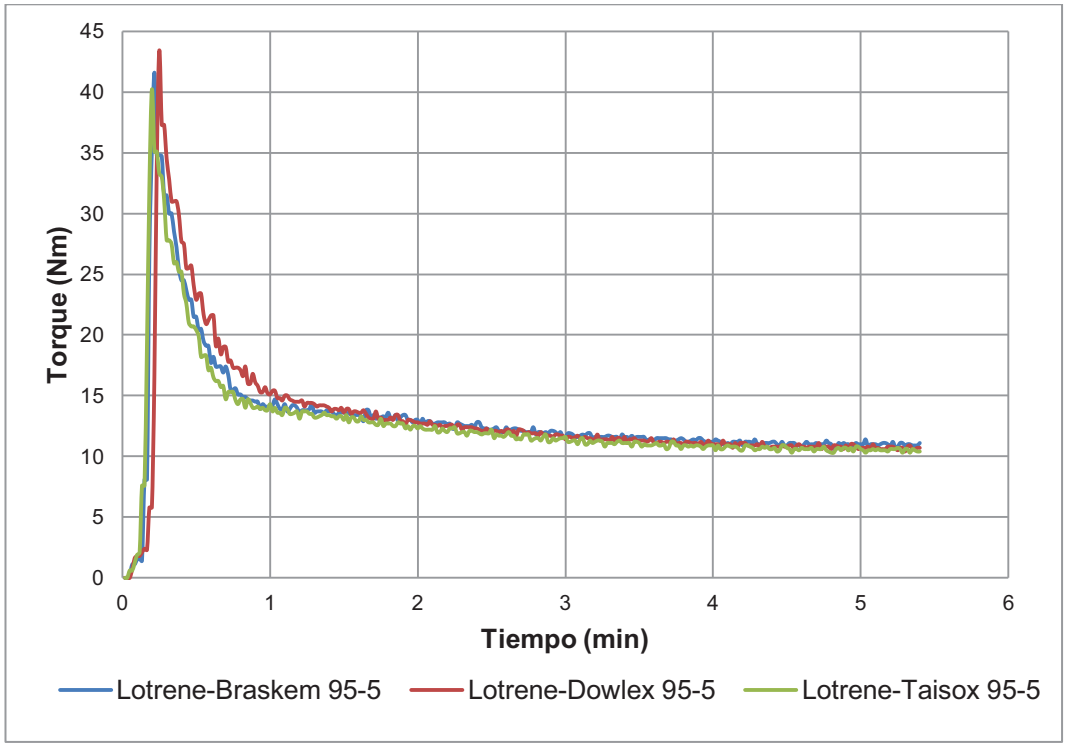


Figura 3.28. Reograma de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox obtenido a 40 rpm y a 180 °C. Todas las mezclas tienen una concentración de 5% de PELBD

Se puede apreciar que las mezclas de PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox presentan el menor torque en la zona de estabilidad con un valor de 8,5 Nm, en otras palabras, estas mezclas exhiben mejor procesabilidad con respecto a todas las analizadas. Esta constituye una razón por la cual se seleccionó al PEBD Hanwha para que sea parte del sistema definitivo PEBD/PELBD.

El PELBD Braskem se seleccionó con base en los análisis de los termogramas que se explican más adelante en la sección 3.2.3.1.

3.2.1.2. Sistema PEBD Hanwha/PELBD Braskem

En un principio se trabajó con concentraciones de 5, 10, 90 y 95% de PELBD Braskem en PEBD Hanwha. El reograma perteneciente a estas mezclas se presenta en la Figura 3.29.

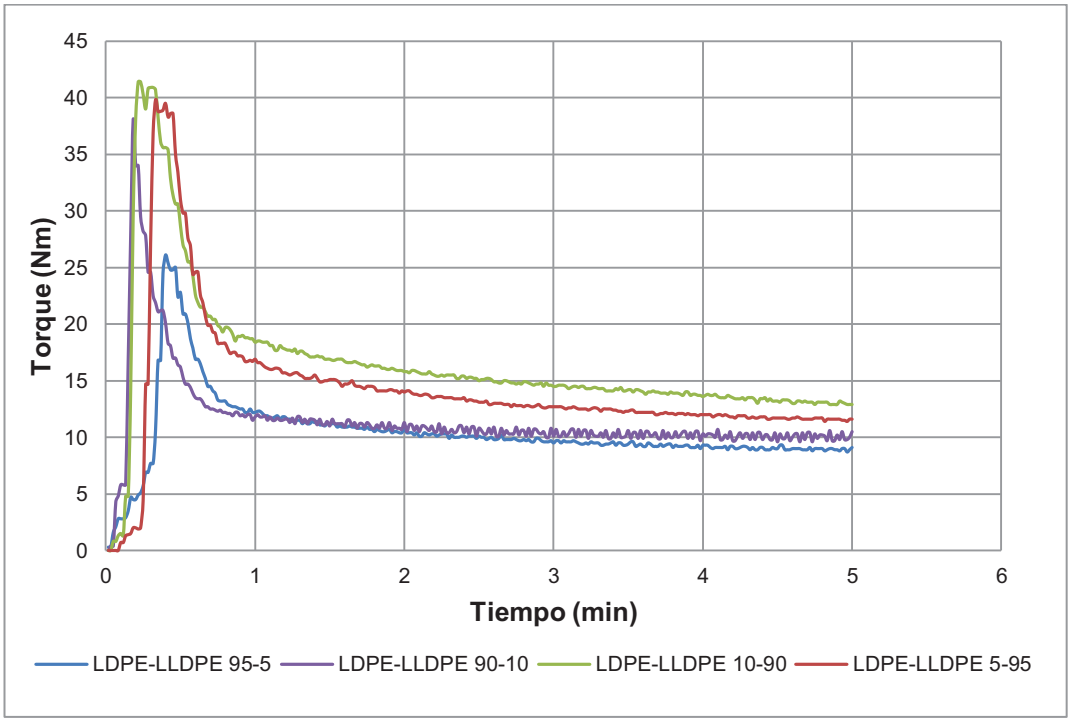


Figura 3.29. Reograma del sistema PEBD Hanwha-PELBD Braskem con concentraciones preliminares obtenido a 40 rpm y a 180 °C

Se observa que para las concentraciones de 5 y 10% de Braskem existe zona de estabilidad a partir de los 4 minutos a torques aproximados de 8,5 y 10 Nm respectivamente. Este comportamiento no ocurre en las concentraciones de 90 y 95% de Braskem donde no se presenta una zona de estabilidad definida y además los torques son mayores que a concentraciones bajas. Esto se debe principalmente a la estructura del PELBD, la cual ocasiona, que su procesamiento requiera mayor torque y tiempo para homogenizar la mezcla. Por estas razones se descartaron las concentraciones de 90 y 95% de Braskem.

El reograma del sistema PEBD Hanwha-PELBD Braskem con las concentraciones definitivas se presenta en la Figura 3.30.

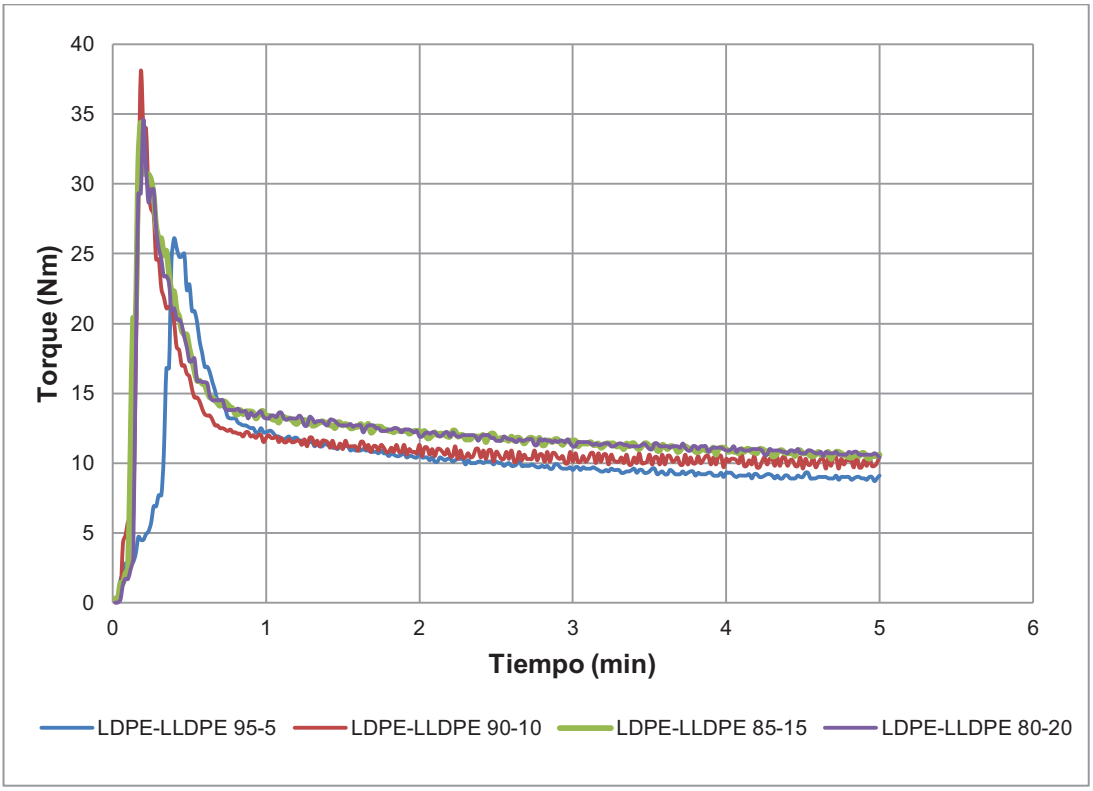


Figura 3.30. Reograma del sistema PEBD Hanwha-PELBD Braskem definitivo obtenido a 40 rpm y a 180 °C

Se aprecia que existe una zona de estabilidad a partir de los 4 minutos. El torque en esta región oscila en un rango entre 8,5 y 11 Nm.

Se puede observar también, que existe ruido presente en las curvas especialmente en la roja que corresponde a 10% de PELBD. El aumento de esta poliolefina en la mezcla produce que el torque registrado en la zona de estabilidad se incremente con respecto a la mezcla de 5% de PELBD. Esto se debe a la estructura y compleja procesabilidad de este tipo de polietileno tal como ya se explicó anteriormente.

3.2.1.3. Sistema PEAD/PP

En la Figura 3.31 se aprecia el reograma del sistema PEAD/PP. A diferencia de las mezclas entre PEBD/PELBD, se observa que la zona de estabilidad está bien definida a partir de 3 minutos y con un solo torque constante aproximado de 3,1 Nm. Además se aprecia que no existe ruido en la región estable

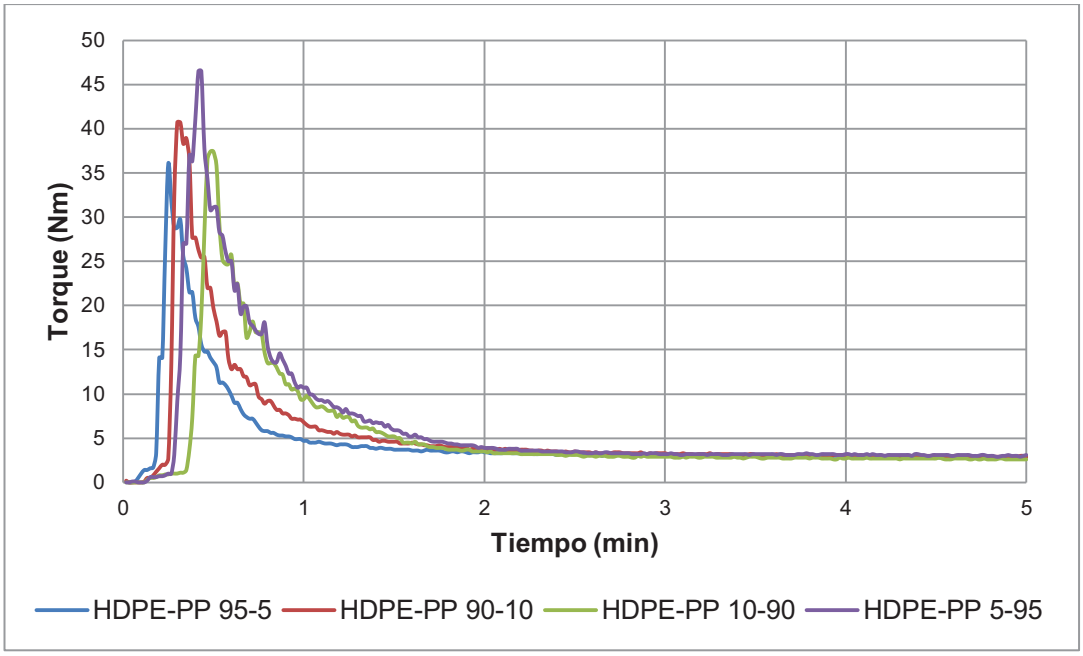


Figura 3.31. Reograma del sistema PEAD/PP obtenido a 40 rpm y a 180 °C

La procesabilidad de estos materiales es superior a los PEBD y PELBD ya que los torque se estabilizan en menor tiempo. Esto podría deberse a que el PEAD exhibe cadenas lineales con escasas ramificaciones. Para este sistema se trabajó con concentraciones de 5, 10, 90 y 95% de PP

3.2.2. EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN Y DISTRIBUCIÓN

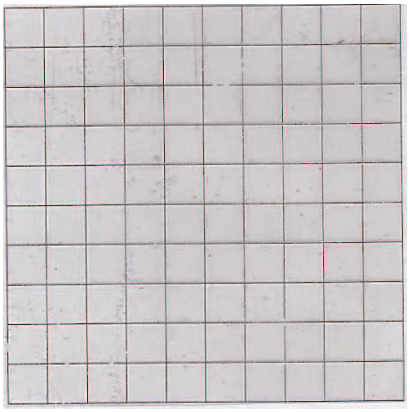
En la Tabla 3.13 se muestran los valores cuantitativos de la dispersión y distribución de las mezclas de poliolefinas. Estos datos fueron obtenidos de los estándares de la Figura 2.3.

Tabla 3.13. Valores cuantitativos de la distribución y dispersión de mezclas entre poliolefinas

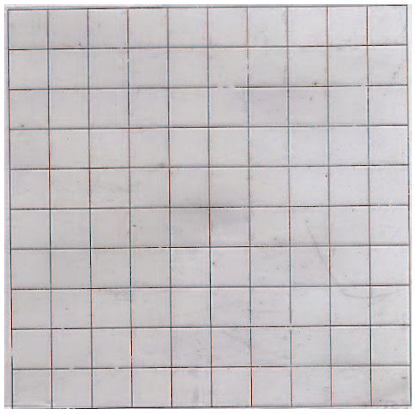
Estándar	Distribución (%)	Dispersión (%)
a	16	38
b	40	88
c	70	59
d	> 70	> 59

A continuación se muestran las fotografías de las probetas de las mezclas observadas en la lámpara de luz fluorescente.

En la Figura 3.32 se pueden observar las probetas de las mezclas entre el PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox. Se aprecia que macroscópicamente no existen señales de mala distribución ni dispersión ya que al compararlas con el estándar “d” no se advierten diferencias significativas. Por otra parte no se observan zonas de diferente coloración que indiquen mayor acumulación de material en alguna región de la probeta. De acuerdo a lo valores de la Tabla 3.13, esta mezclas presentan una distribución y dispersión cuantitativa de más de 70% y 59% respectivamente.

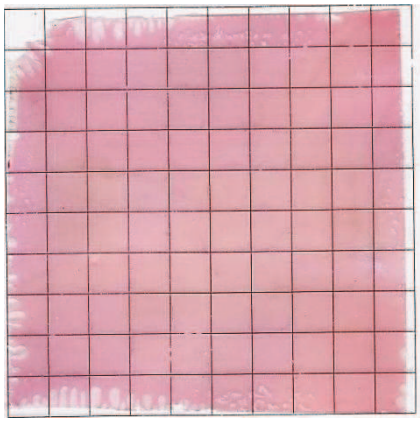


Hanwha/Braskem 95/5



Hanwha/Dowlex 95/5

Hanwha/Taisox 95/5



Estándar “d”

Figura 3.32. Probetas de las mezclas entre el PEBD Hanwha con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox 95/5 obtenidas a 200 °C y 4 000 psi

Asimismo en la Figura 3.33 se muestran las probetas de las mezclas entre el PEBD Dow con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox. Tampoco se aprecian diferencias sustanciales comparadas con el estándar “d” lo que indica una adecuada dispersión y distribución macroscópica. Estas mezclas exhiben también una distribución y dispersión cuantitativa de más de 70% y 59% respectivamente.

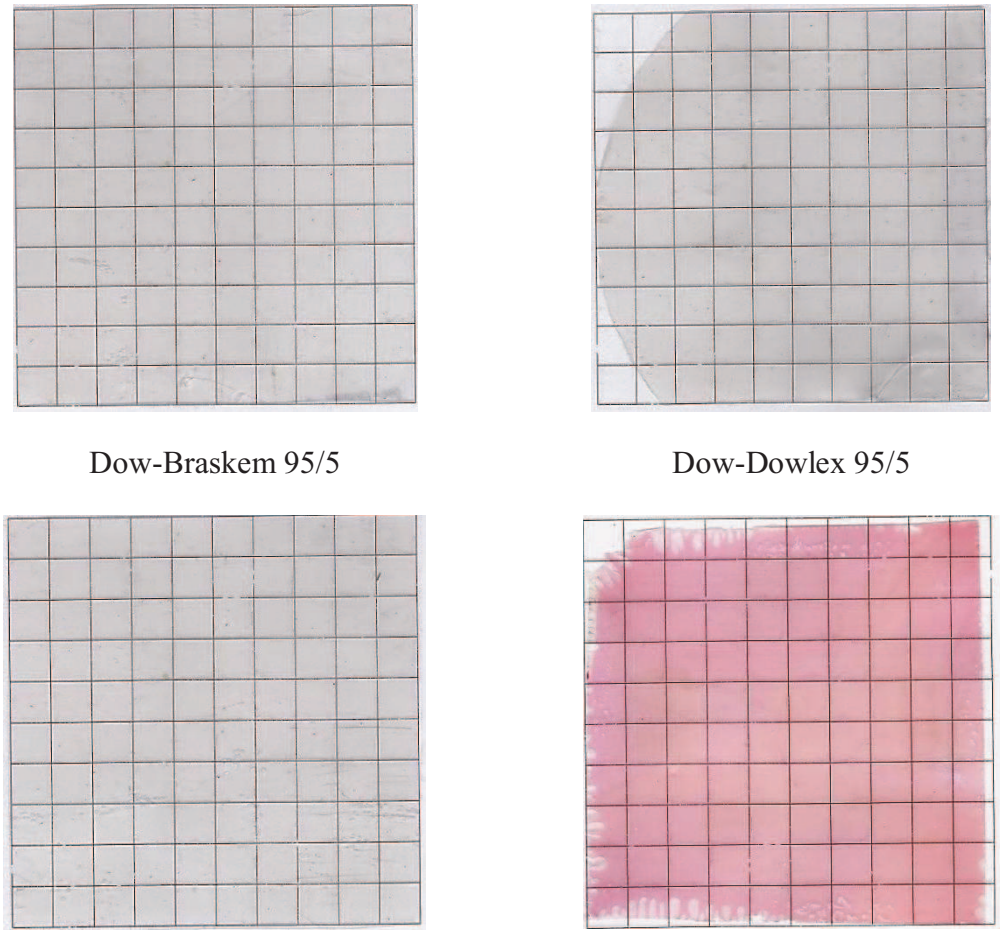


Figura 3.33. Probetas de las mezclas entre el PEBD Dow con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox 95/5 obtenidas a 200 °C y 4 000 psi

Las probetas de las mezclas entre el PEBD Lotrene con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox se muestran en la Figura 3.34. Macroscópicamente no se aprecian diferencias con respecto a la probeta del estándar “d” lo que señala una apropiada dispersión y distribución. No se distinguen zonas de diferente coloración en las probetas las mismas presentan una distribución cuantitativa de más de 70% y una dispersión superior a 59% conforme a los valores de la Tabla 3.13.

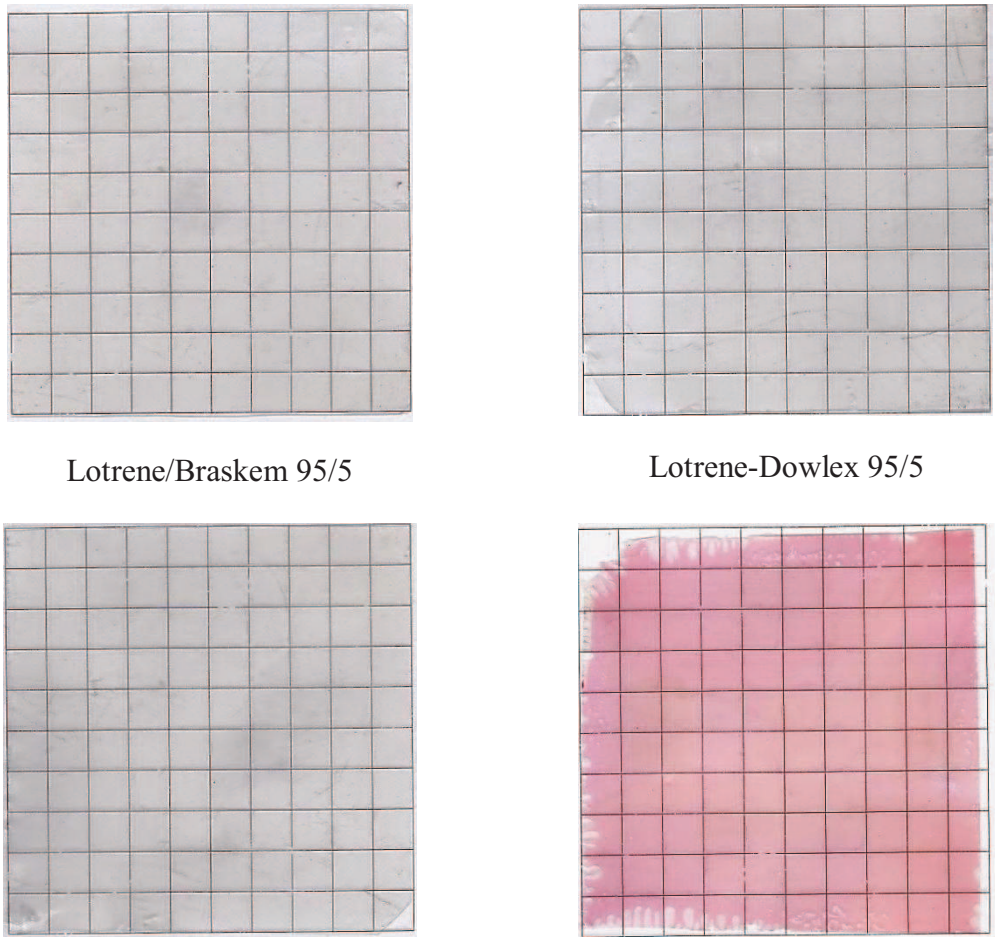
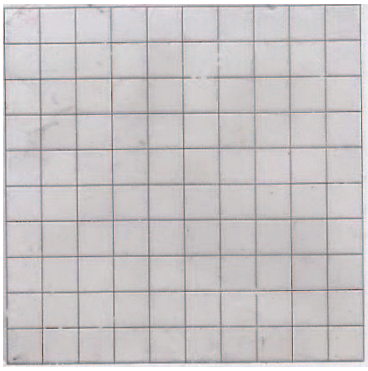


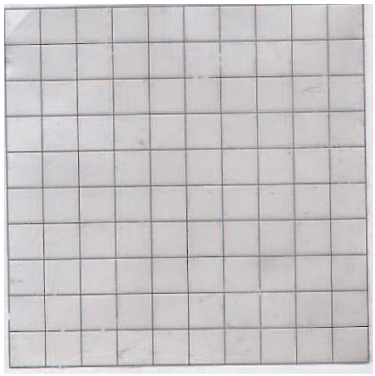
Figura 3.34 Probetas de las mezclas entre el PEBD Lotrene con los PELBD Braskem, Dowlex y Taisox 95/5 obtenidas a 200 °C y 4 000 psi

En Figura 3.35 se muestran las probetas de las mezclas con las concentraciones definitivas entre el PEBD Hanwha y PELBD Braskem. De igual manera que en los casos anteriores, no se observan diferencias significativas con respecto al estándar “d” lo que indica una buena dispersión y distribución macroscópica de las mezclas en estudio. No se aprecian zonas donde exista distinta coloración en las probetas analizadas. Con base en los valores de la Tabla 3.13, estas mezclas presentan una distribución y dispersión cuantitativa de más de 70% y 59% respectivamente.

LDPE-LLDPE 95-5

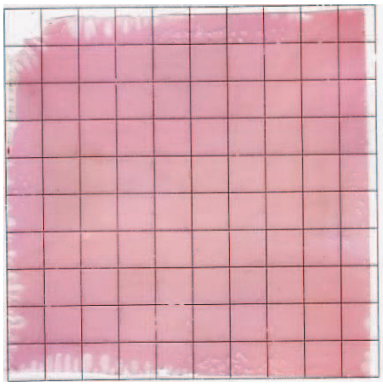


LDPE-LLDPE 90-10



LDPE-LLDPE 85-15

LDPE-LLDPE 80-20

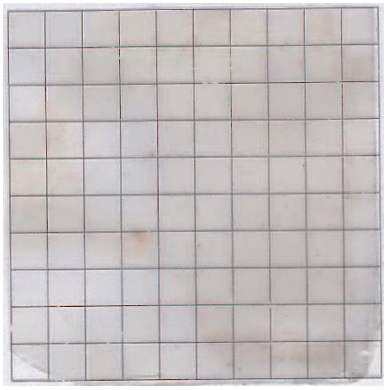


Estándar “d”

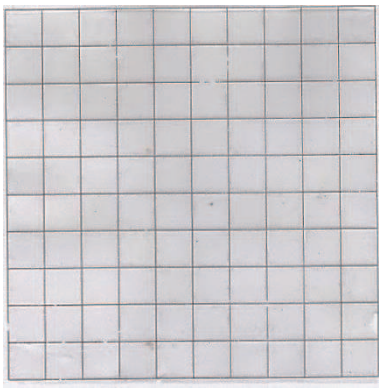
Figura 3.35. Probetas de las mezclas definitivas entre el PEBD Hanwha y PELBD Braskem obtenidas a 200 °C y 4 000 psi

Finalmente, en la Figura 3.36 se exhiben las probetas del sistema PEAD/PP. En las fotografías de las mezclas HDPE/PP 95/5 y HDPE/PP 5/95 se aprecian zonas de coloración parda que fueron originadas por el molde metálico mas no implican una inadecuada dispersión ni distribución. Si se comparan todas las probetas de

este sistema con el estándar “d”, no se aprecian diferencias macroscópicas significativas. Todas estas mezclas muestran una distribución y dispersión cuantitativa de más de 70% y 59% respectivamente.

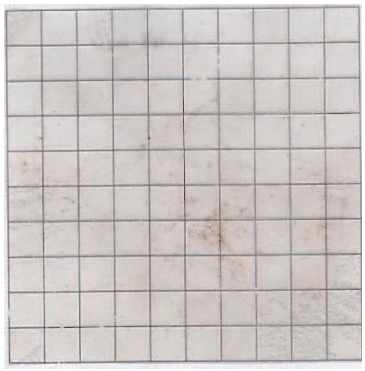


HDPE/PP 95/5

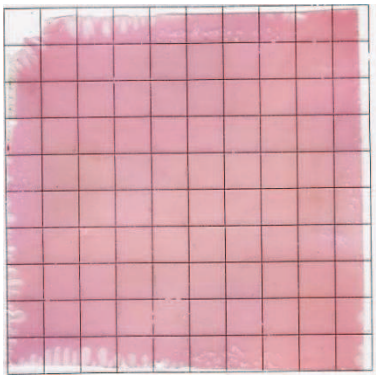


HDPE/PP 90/10

HDPE/PP 10/90



HDPE/PP 5/95



Estándar “d”

Figura 3.36. Probetas de las mezclas PEAD/PP obtenidas a 210 °C y 4 000 psi

3.2.3. ANÁLISIS POR DSC DE LAS MEZCLAS

3.2.3.1. Selección de polietilenos

A continuación se muestran los termogramas de las mezclas PEBD/PELBD a una concentración de 95/5 en peso para la selección de los polietilenos. Se determinó la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía fusión. Las masas de las muestras y de las celdas utilizadas en estos ensayos se adjuntan en la Tabla A VIII.4.

En la Figura 3.37 se muestra el termograma del PEBD Hanwha con los tres PELBD Dowlex, Taisox y Braskem. Se observa que en el rango comprendido entre 120 y 130 °C la mezcla Hanwha-Braskem es la única que exhibe un hombro a 122,3 °C lo que indica la presencia del PELBD. Esto no ocurre en las curvas pertenecientes a Hanwha-Dowlex y Hanwha-Taisox efecto que podría deberse a la presencia de dos comonómeros en cada PELBD tal como se determinó anteriormente.

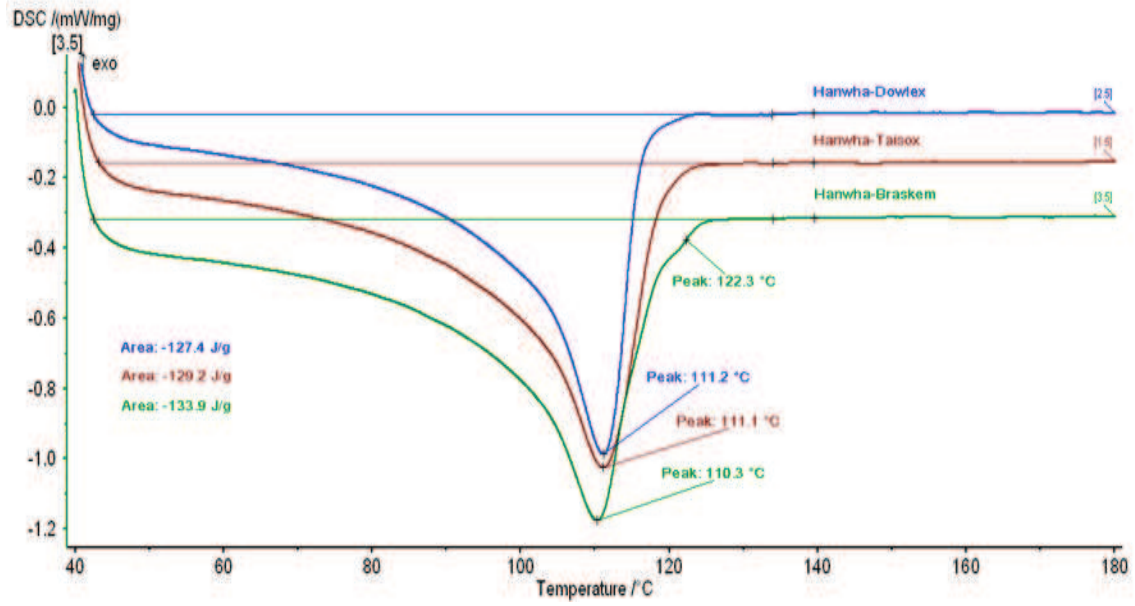


Figura 3.37. Termograma de las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

Por otra parte, se aprecia que la temperatura de fusión del PEBD Hanwha en las tres mezclas, descendió con respecto al valor determinado como material virgen que fue de 112,2 °C. El mismo efecto sucede con la temperatura de fusión del PELBD Braskem que descendió de 125,3 a 122,3 °C. Este comportamiento, según Taipe (2008), se produce por la dificultad para formar cristales en la mezcla debido a las estructuras ramificadas de este tipo de polietilenos (p. 109).

En la Tabla 3.8 se puede apreciar que los valores de entalpía de fusión de los PEBD y PELBD son muy cercanos y poseen además una mayor desviación estándar que la temperatura de fusión. Esto dificulta explicar o predecir el comportamiento del calor de fusión en las mezclas entre polietilenos de baja y lineales de baja densidad. La entalpía de fusión en las mezclas Hanwha-Braskem y Hanwha-Taisox aumentó su valor con respecto a la de sus componentes vírgenes, mientras que en la mezcla Hanwha-Dowlex el calor de fusión se mantuvo en el rango de sus componentes puros.

En la Figura 3.38 se muestra el termograma del PEBD Hanwha con los tres PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento. Se aprecian en todas las mezclas dos picos: uno bien definido entre 96,3 y 97,0 °C y otro pequeño entre 60,0 y 60,9 °C.

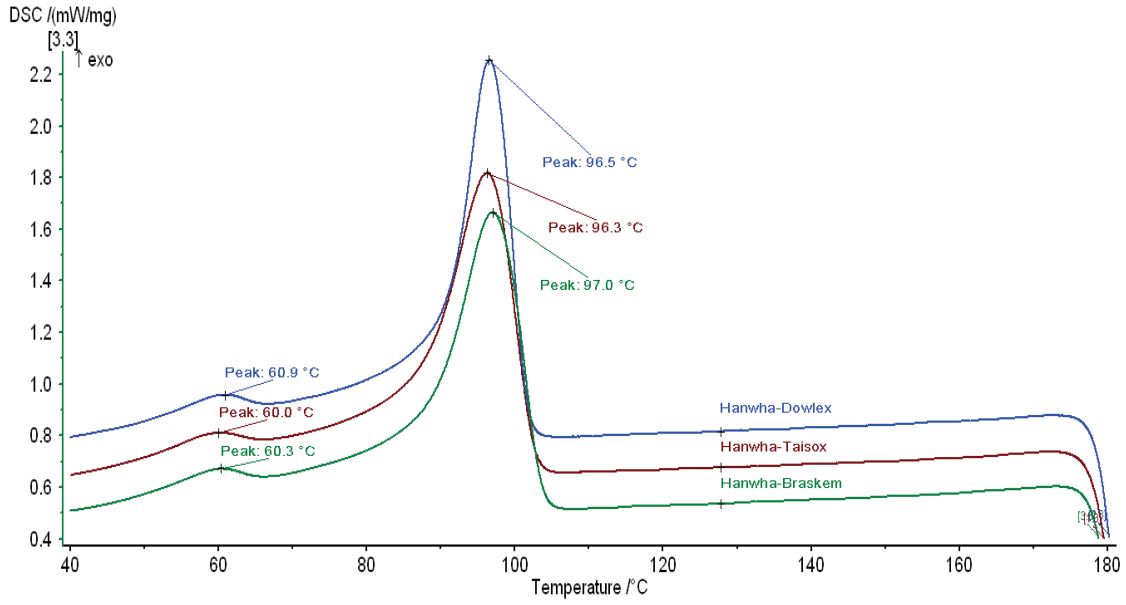


Figura 3.38. Termograma de las mezclas PEBD Hanwha con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

En el sistema Hanwha-Braskem la temperatura de cristalización aumentó 3 °C con respecto al PEBD Hanwha y disminuyó 9,5 °C con respecto al PELBD Braskem. Este comportamiento es similar en las mezclas Hanwha-Dowlex y Hanwha-Taisox. Esto se debe a que el PELBD, al tener un menor número de ramificaciones largas, permite que la mezcla cristalice a una mayor temperatura comprada con la del PEBD Hanwha.

El termograma perteneciente al segundo calentamiento de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem se muestra en la Figura 3.39. Se puede observar que entre 120 y 130 °C existe un solo hombro a 121,3 °C que revela la presencia del PELBD Braskem. La temperatura de fusión de este polietileno disminuyó en 4 °C. El valor de dicha transición para el PEBD Lotrene también decreció salvo en la mezcla Lotrene-Dowlex donde la temperatura aumentó en 0,5 °C.

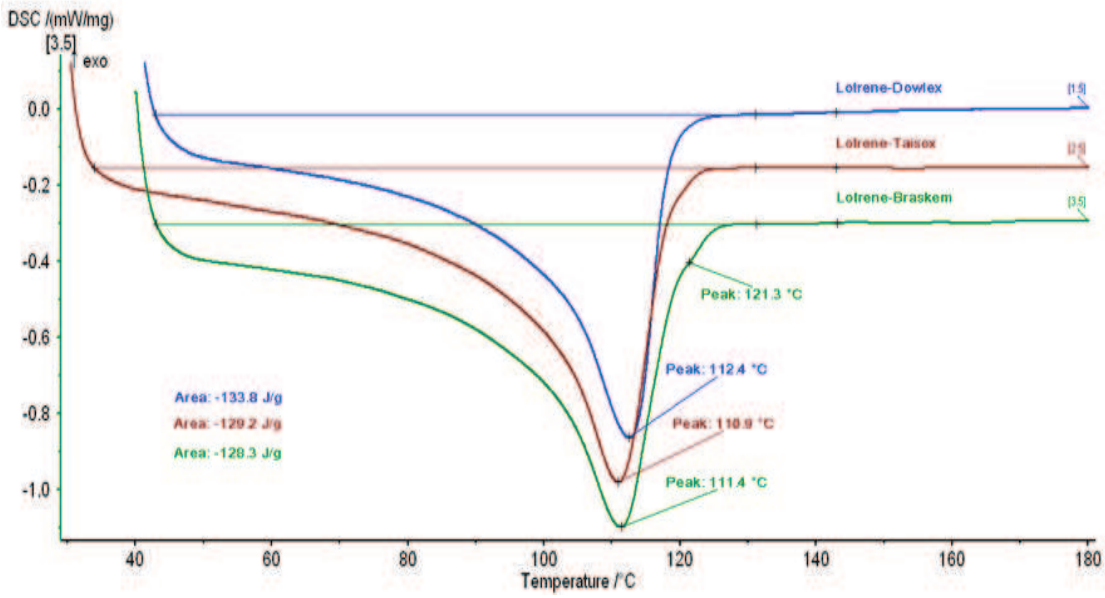


Figura 3.39. Termograma de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

Aunque esta variación es mínima, puede deberse a la presencia de cristalitos de mayor tamaño que originan el incremento en la temperatura de fusión. Este comportamiento también se puede originar, de acuerdo a Taipe (2008), a la

dificultad para formar cristales por las estructuras ramificadas de ambos polietilenos (p.109).

En la figura 3.40 se aprecian dos picos correspondientes a dos nucleaciones en las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem. Un pico claramente definido se observa entre 94,3 y 95,9 °C y otro pequeño entre 59,1 y 59,7 °C. En general la temperatura de cristalización de la mezcla aumenta con respecto a la del PEBD Lotrene y decrece comparada con la del PELBD por su menor contenido de ramificaciones.

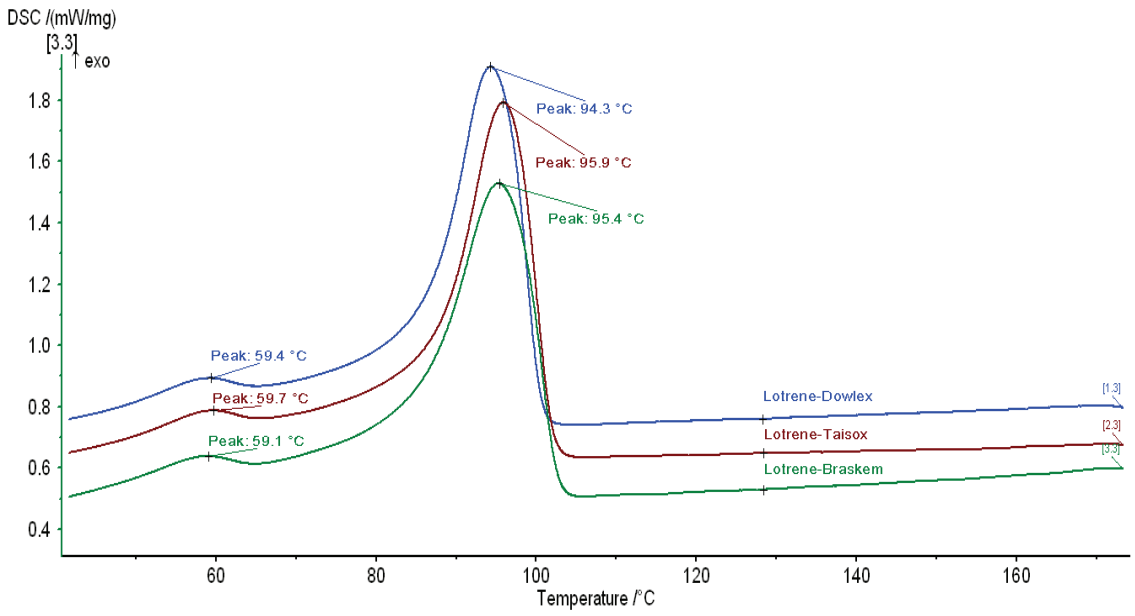


Figura 3.40. Termograma de las mezclas PEBD Lotrene con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

En la Figura 3.41 se aprecia el termograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento. Se puede observar, al igual que en los termogramas anteriores, un único hombro a 121,3 °C que advierte la presencia del PELBD Braskem. El valor de la temperatura de fusión para este polietileno decreció en 4 °C. Para el PEBD Dow, el valor de dicha transición también disminuyó excepto en el sistema Dow-Dowlex donde la temperatura se incrementó en 2 °C debido a la presencia de cristalitos de mayor tamaño. Este comportamiento también podría producirse por lo

explicado anteriormente por Taipe (2008) con respecto a las ramificaciones de PEBD y del PELBD (p.109).

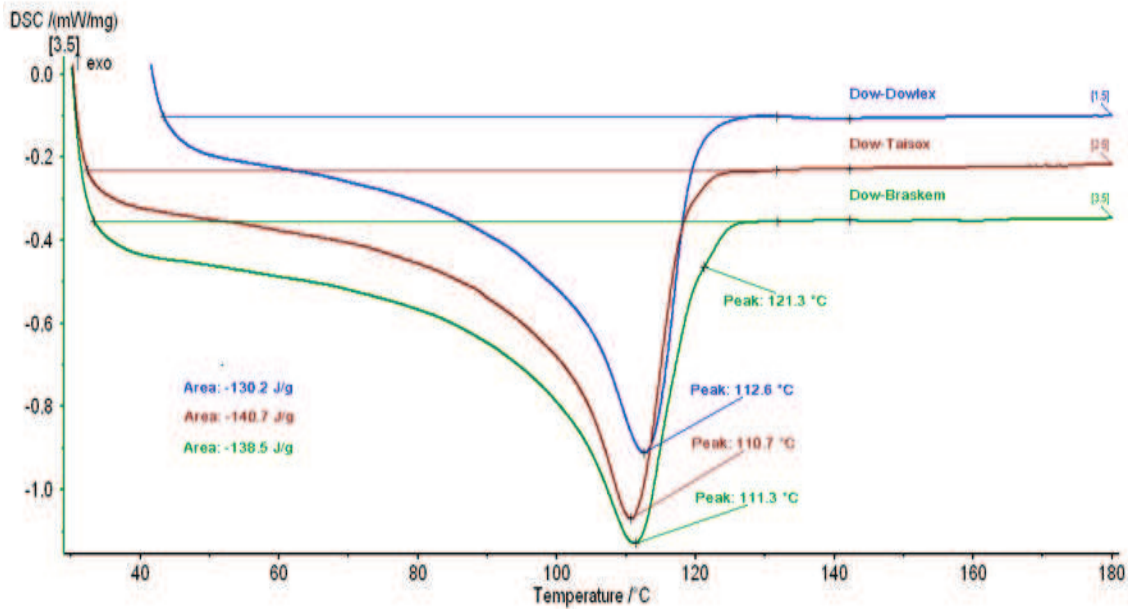


Figura 3.41. Termograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

Las temperaturas de cristalización de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem se muestran en el termograma de la Figura 3.42. Se observan dos picos: uno bien definido entre 94,9 y 96,7 °C y otro pequeño entre 59,5 y 60,9 °C. La tendencia es la misma que en los termogramas de las Figuras 3.38 y 3.40. La temperatura de cristalización de la mezcla se incrementa con respecto al PEBD Dow pero decrece comparada con los PELBD.

Braskem constituye el único PELBD que exhibe un hombro entre 120 y 130 °C en los termogramas analizados anteriormente. Esto podría deberse a que en su estructura existe un solo tipo de comonómero 1-buteno. Esta es una razón por la que se seleccionó a este polietileno como uno de los componentes del sistema PEBD/PELBD.

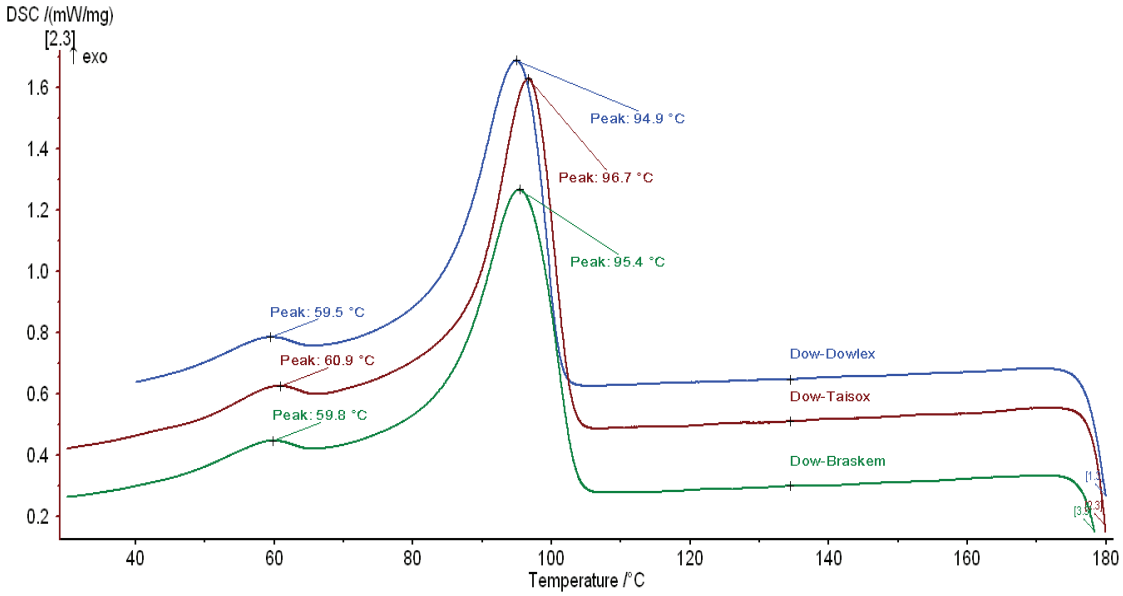


Figura 3.42. Termograma de las mezclas PEBD Dow con los PELBD Dowlex, Taisox y Braskem correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

En la Figura 3.43 se comparan los termogramas de las mezclas PEBD Lotrene, Hanwha y Dow con el PELBD Braskem.

Se observa que la mezcla entre Hanwha y Braskem exhibe un hombro con mejor definición y a mayor temperatura entre 120 y 130 °C que los sistemas Lotrene-Braskem y Dow-Braskem. Esta constituye otra razón por la cual se escogió a la mezcla Hanwha-Braskem como la definitiva

Además el PEBD Hanwha presentó el menor torque en la zona de estabilidad de acuerdo a los reogramas estudiados en la sección 3.2.1.1, lo cual indica su adecuada procesabilidad. Por otra parte el PELBD Braskem, conforme al termograma de la Figura 3.7 y al espectro de la Figura 3.25, exhibe en su estructura un solo tipo de comonómero lo cual facilita la interacción entre sus cadenas en la mezcla comparada con los PELBD Dowlex y Taisox que presentan dos tipos de comonómeros en sus estructuras.

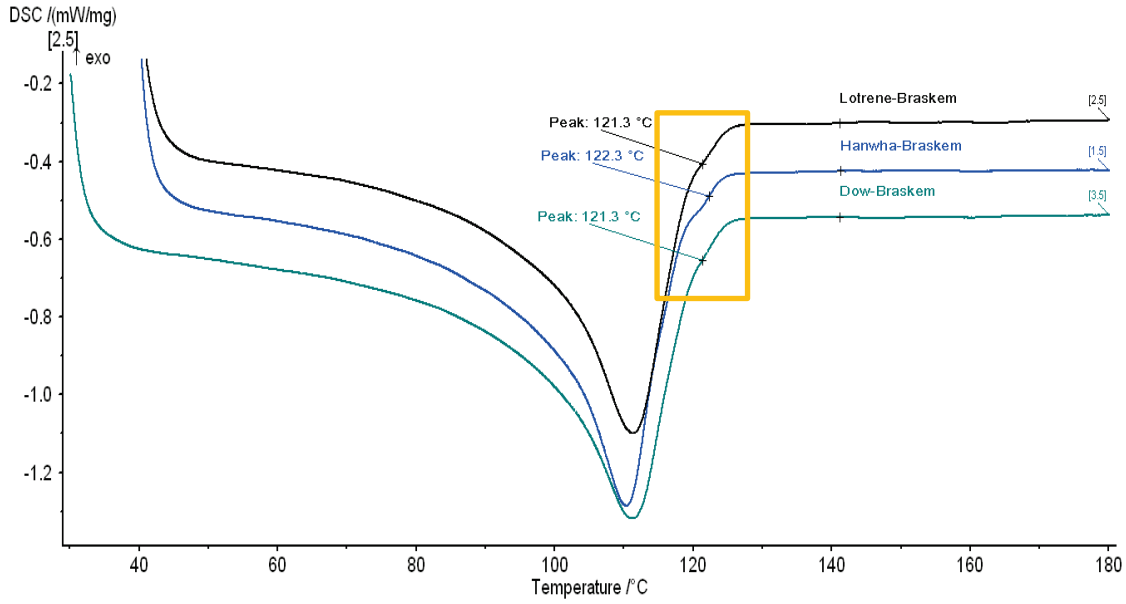


Figura 3.43. Termograma de las mezclas PEBD Dow, Hanwha y Lotrene con el PELBD Braskem correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

3.2.3.2. Sistema PEBD Hanwha/PELBD Braskem

En esta sección se presentan los termogramas del sistema PEBD Hanwha con el PELBD Braskem. Las curvas de color azul, rojo y verde corresponden a la primera segunda y tercera repeticiones respectivamente. Las masas de las muestras y de las celdas usadas se indican en la Tabla A VIII.6.

- PEBD/PELBD 95/5

En la Figura 3.44 se presenta el termograma de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 perteneciente al segundo calentamiento. En todas las repeticiones se pueden observar un pico amplio y definido a 110,7 ± 0,4 °C así como un pequeño hombro a 121,9 ± 0,4 °C correspondientes al PEBD y al PELBD respectivamente. Además se aprecia que estos valores disminuyeron con respecto al de sus componentes puros lo que implica que las ramificaciones cortas del PELBD influyen en la formación de cristales en la mezcla.

El calor necesario para fundirla tiene un valor de 134,6 ± 5,6 J/g, dato que se encuentra fuera del rango de los componentes vírgenes por lo anteriormente explicado en el numeral 3.2.3.1.

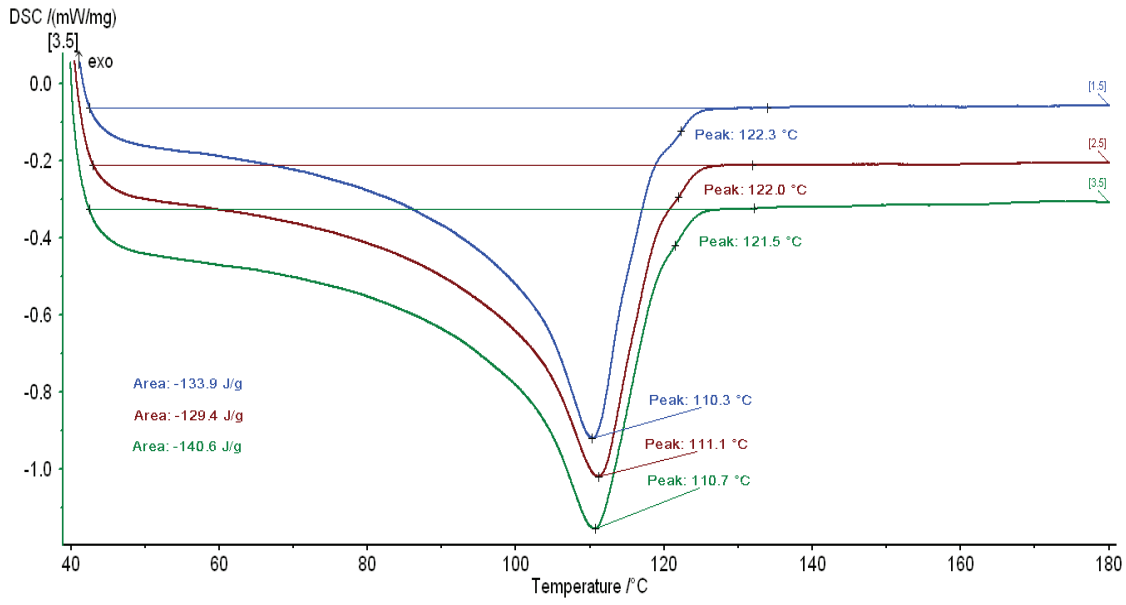


Figura 3.44. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

La curva de enfriamiento de esta mezcla se muestra en la Figura 3.45. Se observan dos picos: uno pequeño a 60,3 ± 0,3 °C y otro notorio a 95,6 ± 0,5 °C que advierten la presencia de dos nucleaciones. La temperatura de cristalización del PEBD se incrementó en 1,6 °C mientras que la del PELBD disminuyó en 10,9 °C.

Esto implica que el polietileno lineal actúa como agente nucleante de los cristalitos del PEBD. La nucleación en este tipo de mezclas, según Abe y Yamaguchi (1999), también podría producirse por los catalizadores Zieglar-Natta usados en la síntesis (p. 3158).

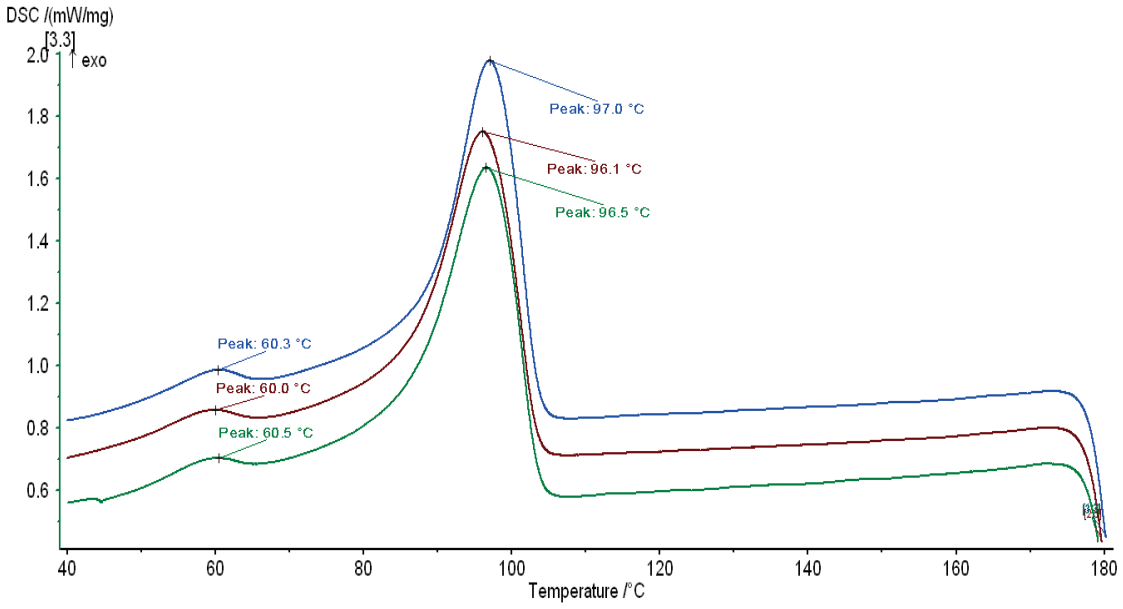


Figura 3.45. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

- PEBD/PELBD 90/10

En la Figura 3.46 se muestra el termograma del segundo calentamiento con las tres repeticiones de la mezcla PEBD/PELBD 90/10.

Se puede apreciar un pico definido a 110,8 ± 0,4 °C perteneciente al PEBD. A partir de los 116 °C hasta los 124 °C aproximadamente, se observa un hombro amplio con dos salientes a 118,2 ± 0,2 °C y 122,9 ± 0,1 °C. Estas tres transiciones determinadas, de acuerdo al estudio realizado por Bigger, Cran y Scheirs (2005), sugieren la presencia de una tercera fase cristalina en la mezcla (p. 323).

El calor de fusión para este sistema fue de 130,1 ± 1,3 J/g. Este dato también se encuentra fuera del rango de los materiales puros. En todo caso se aprecia que la entalpía disminuyó con el incremento de la concentración de PELBD.

En la Figura 3.47 se muestra la curva de enfriamiento para la mezcla PEBD/PELBD 90/10. Se observa un pico claramente definido a 95,5 ± 0,9 °C con la presencia de un pequeño hombro a 100,9 ± 0,2 °C.

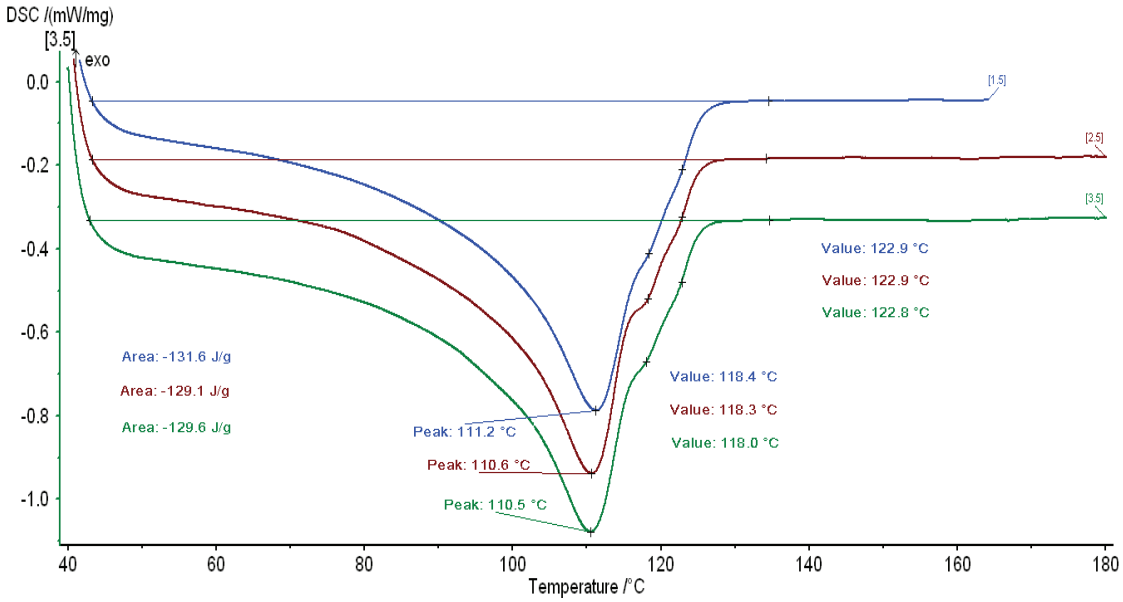


Figura 3.46. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

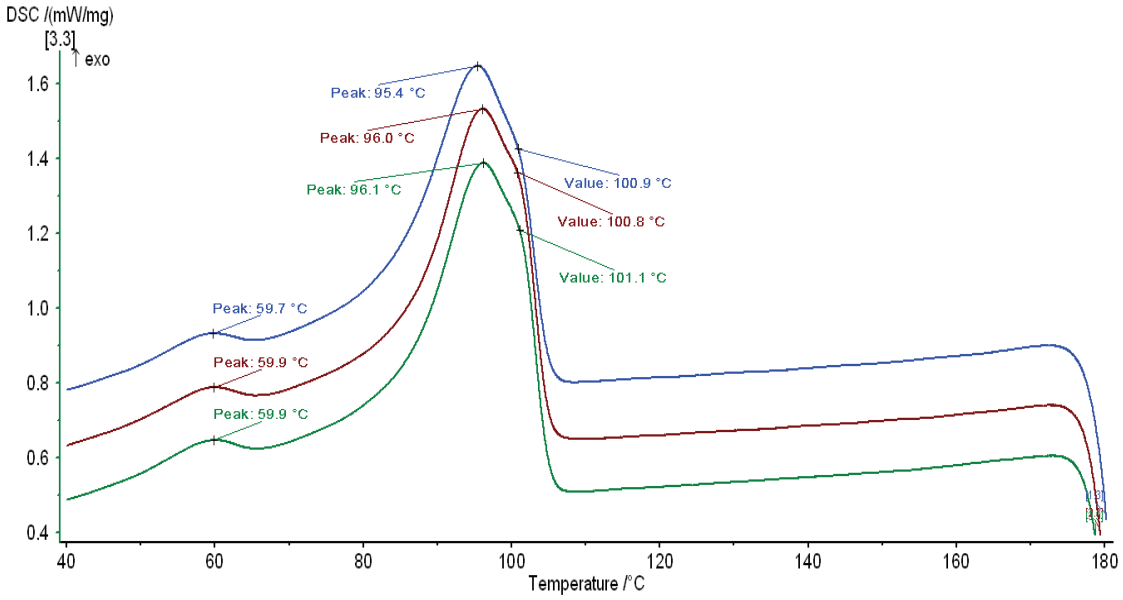


Figura 3.47. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

Asimismo se distingue un pico a 59,8 ± 0,1 °C. En general se producen dos nucleaciones en la mezcla, pero el hombro presente a 100,9 °C sugiere una nucleación adicional del PELBD que no es muy marcada de acuerdo al termograma. Este efecto puede ser producto del incremento de las cadenas cortas por parte del PELBD en la mezcla.

La temperatura de cristalización del PEBD se incrementó en 1,5 °C mientras que para el PELBD disminuyó en 5,6 °C. Esto indica que el polietileno en menor proporción actúa como un agente nucleante.

- PEBD/PELBD 85/15

El termograma del segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 se muestra en la Figura 3.48. En todas las repeticiones efectuadas se pueden apreciar dos picos: uno de mayor intensidad a 110,9 ± 1,1 °C correspondiente al PEBD y otro de menor magnitud a 119,6 ± 0,9 °C perteneciente al PELBD. A diferencia del termograma de la Figura 3.46, se aprecia una sola transición entre 116 y 124 °C lo que implica que esta mezcla exhibe dos fases cristalinas.

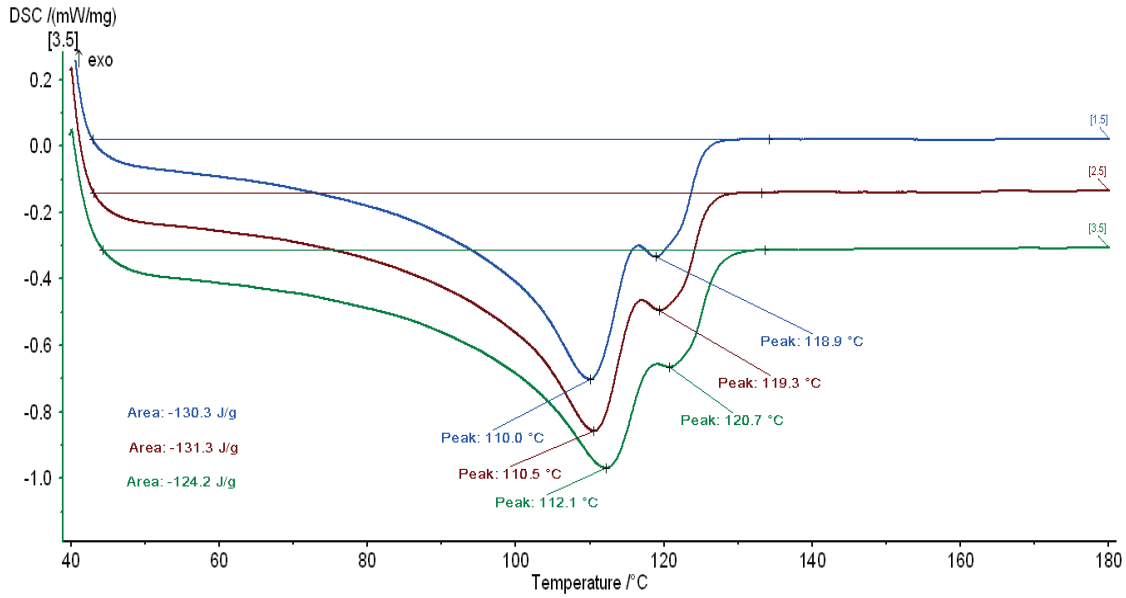


Figura 3.48. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

Los valores de las temperaturas de fusión del PEBD y del PELBD disminuyen con respecto a sus componentes puros en 1,3 y 5,7 °C respectivamente. La entalpía necesaria para fundir esta mezcla es de 128,6 ± 3,8 J/g.

En la Figura 3.49 se muestra el termograma del primer enfriamiento de la mezcla PEBD/PELBD 85/15. Se distingue un pico de pequeña intensidad a 59,8 ± 1,0 °C y otros dos de mayor magnitud a 95,1 ± 1,2 °C y 102,1 ± 0,7 °C que indican las nucleaciones separadas de los cristalitos del PEBD y PELBD.

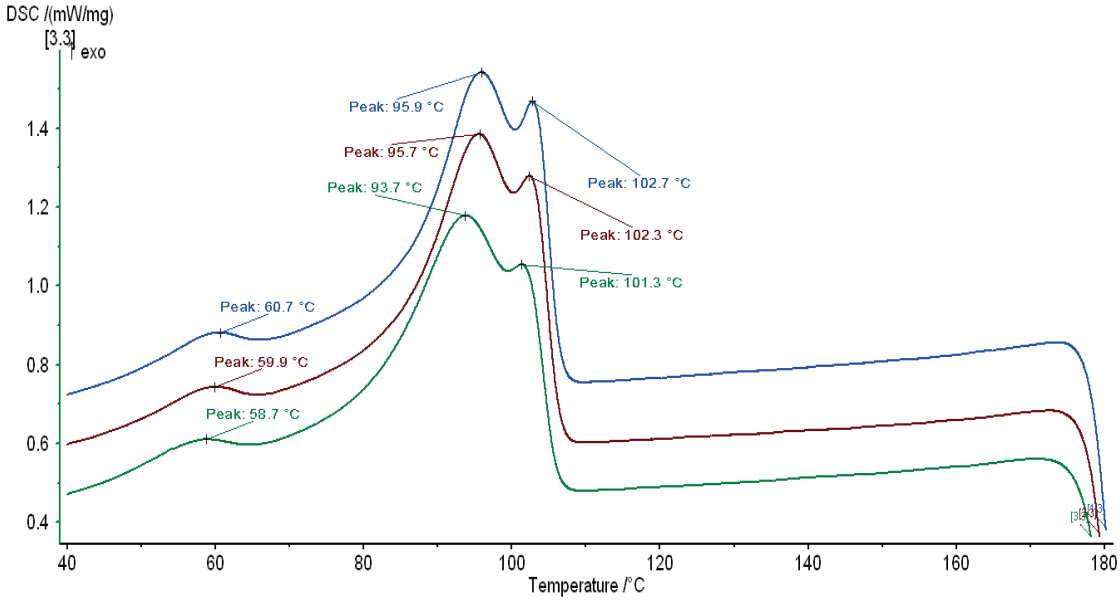


Figura 3.49. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

La temperatura de cristalización del PEBD se incrementó en 1,1 °C mientras que la del PELBD disminuyó en 4,4 °C. A pesar de que ocurre una cristalización marcada para cada material, el PELBD continúa como agente nucleante del PEBD.

- PEBD/PELBD 80/20

En la Figura 3.50 se muestra el termograma del segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 80/20. Se aprecian dos picos a 110,1 ± 0,5 °C y 121,1 ± 0,8

°C que corresponden al PEBD y al PELBD respectivamente. La temperatura de fusión de ambos materiales disminuyó con respecto al valor de los componentes puros. Taipe (2008) especifica que las ramificaciones de los dos polietilenos provocan el descenso de la temperatura debido a imposibilitan la creación de cristales de mayores dimensiones (p. 110).

La entalpía de fusión de la mezcla es de 127,0 ± 3,7 J/g. Este valor también se encuentra fuera del rango de los materiales puros pero se puede observar que a mayor contenido de PELBD dicha energía disminuye.

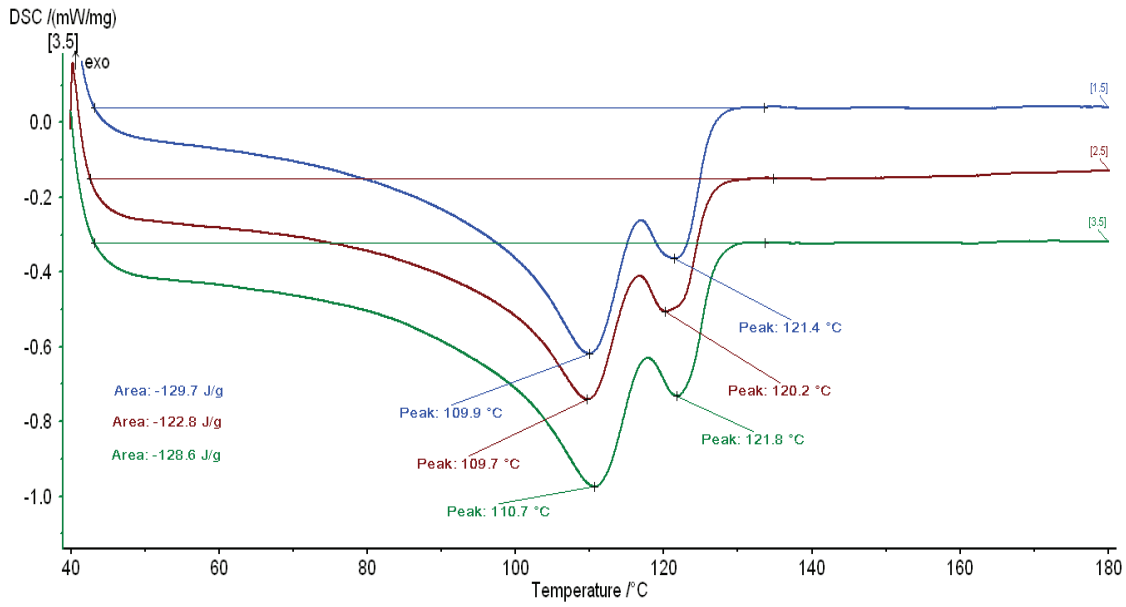


Figura 3.50. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

El termograma del primer enfriamiento de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 se presenta en la Figura 3.51. Claramente se observan tres picos: uno pequeño a 60,2 ± 0,6 °C y otros dos de mayor intensidad a 95,4 ± 0,5 °C y 103,5 ± 0,4 °C que también sugieren las nucleaciones separadas de los cristalitos del PEBD y del PELBD.

La temperatura de cristalización del PEBD aumentó su valor en 1,4 °C mientras que esta transición térmica para el PELBD disminuyó en 3 °C. Este valor, si se lo compara con el de las mezclas anteriores, es el menor. Esto implica que a mayor

concentración de PELBD en la mezcla, sus cristalitos tienden a formase a la temperatura de cristalización del componente puro.

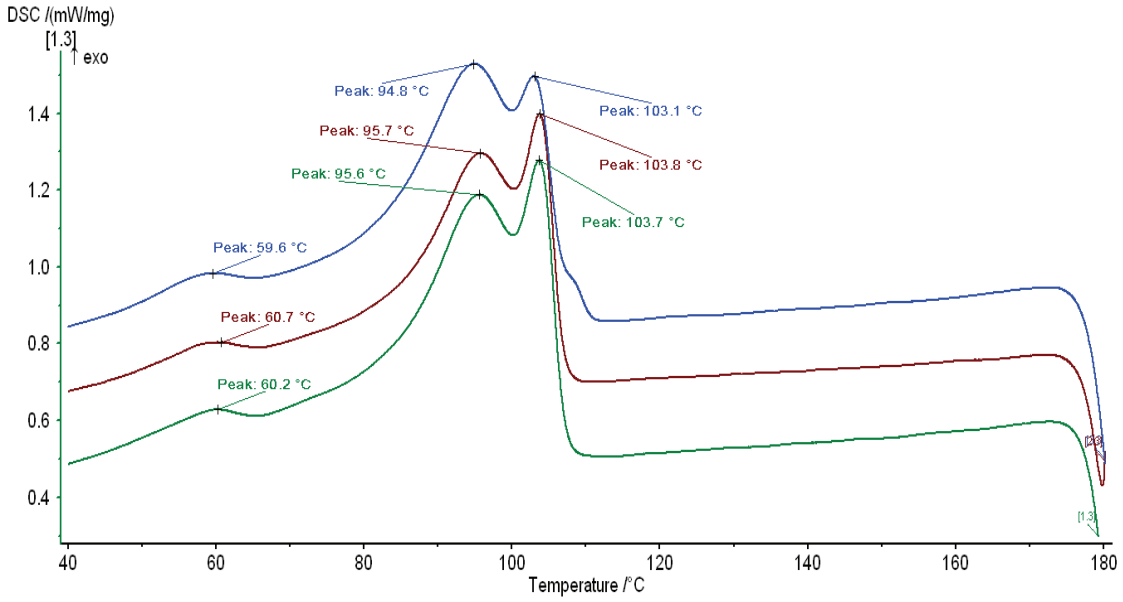


Figura 3.51. Termograma de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

En la tabla 3.14 se resumen los valores de las transiciones determinadas para el sistema PEBD/PELBD.

Tabla 3.14. Valores de las transiciones térmicas determinadas para el sistema PEBD/PELBD a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min

% PELBD	Temperatura de fusión PEBD (°C)	Temperatura de fusión PELBD (°C)	Entalpía de fusión (J/g)	Temperatura de cristalización PEBD (°C)	Temperatura de cristalización PELBD (°C)
0	112,2 ± 0,5	-	126,7 ± 1,8	94,0 ± 0,6	-
5	110,7 ± 0,4	121,9 ± 0,4	134,6 ± 5,6	95,6 ± 0,5	-
10	110,8 ± 0,4	122,9 ± 0,1	130,1 ± 1,3	95,5 ± 0,9	100,9 ± 0,2
15	110,9 ± 1,1	119,6 ± 0,9	128,6 ± 3,8	95,1 ± 1,2	102,1 ± 0,7
20	110,1 ± 0,5	121,1 ± 0,8	127,0 ± 3,7	95,4 ± 0,5	103,5 ± 0,4
100	-	125,3 ± 0,6	123,1 ± 2,8	-	106,5 ± 0,6

En la Figura 3.52 se muestra una comparación entre los termogramas del segundo calentamiento del sistema PEBD/PELBD. Se observa que las temperaturas de fusión de ambos polietilenos en la mezcla son menores que las de sus componentes puros. Las líneas entrecortadas permiten observar este comportamiento.

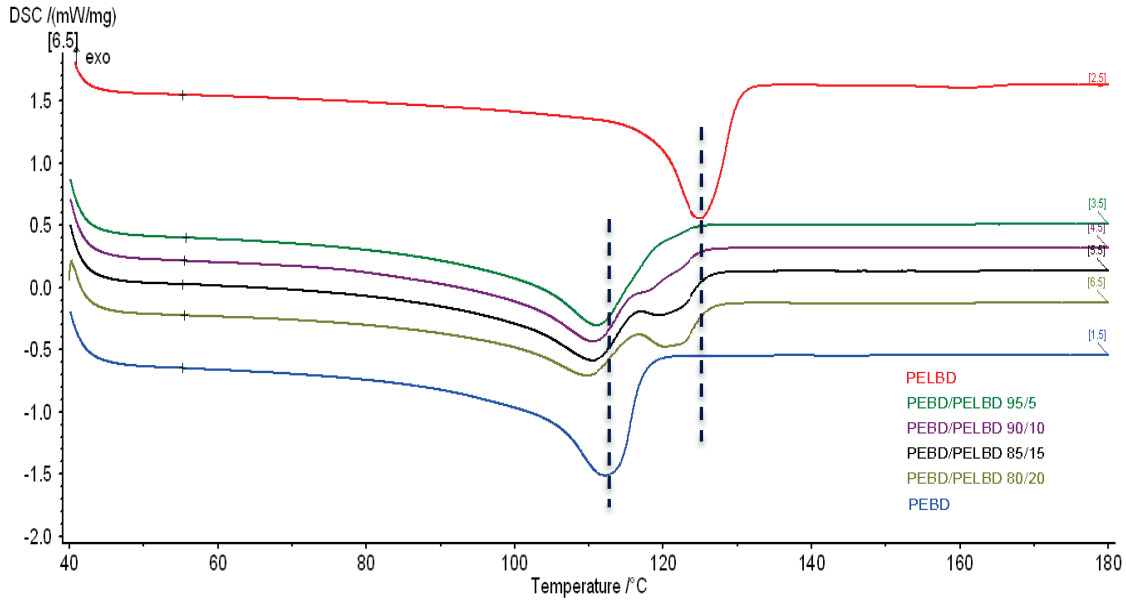


Figura 3.52. Comparación de los termogramas del sistema PEBD/PELBD y de sus componentes puros correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

Se puede apreciar también que la intensidad de los picos del PELBD en las mezclas es proporcional al porcentaje de este material. Lo mismo ocurre con los picos del PEBD.

Por otra parte, en la Figura 3.53 se aprecia la comparación de los termogramas pertenecientes a las curvas de enfriamiento del sistema PEBD/PELBD. En ellos se observa que la temperaturas de cristalización en la mezclas son mayores que las del PEBD y menores que las PELBD. Esto implica, tal como se explicó anteriormente, que el componente minoritario actúa como agente nucleante de los cristalitos del PEBD. El pequeño pico presente a 60 °C aproximadamente, no presenta variaciones significativas con respecto a la concentración de PELBD.

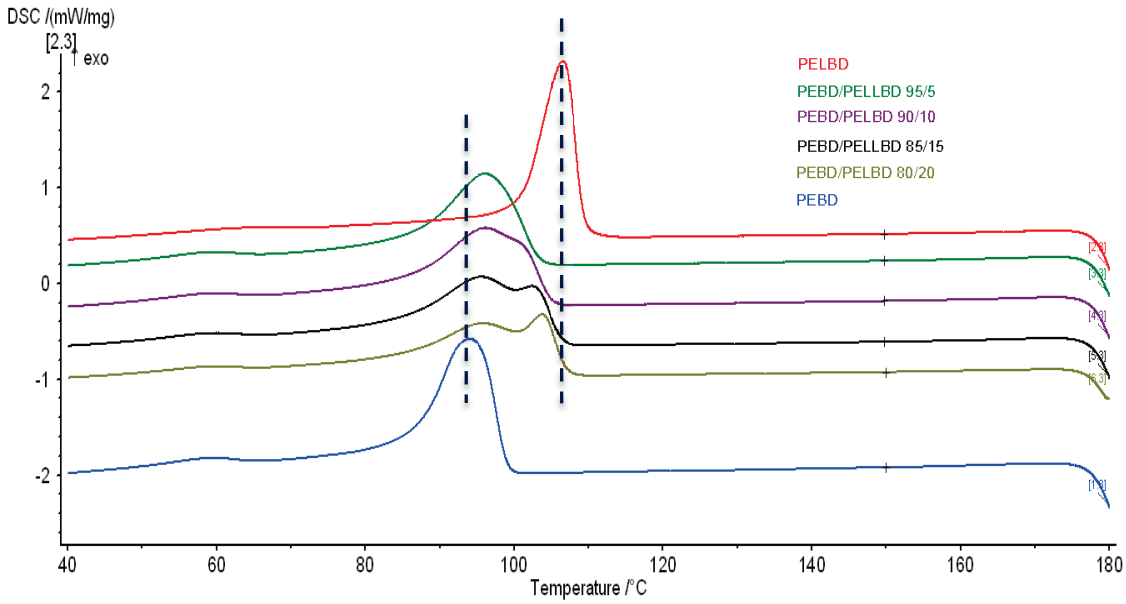


Figura 3.53. Comparación de los termogramas del sistema PEBD/PELBD y de sus componentes puros correspondientes al primer calentamiento a 10 °C/min

La variación de la temperatura de fusión del PEBD en la mezcla con respecto al porcentaje de PELBD se presenta en la Figura 3.54. Se observa que todos los valores son menores que el de su componente puro que es de 112,2 °C.

Además se aprecia que a concentraciones entre 5 y 15% esta transición no sufre variaciones significativas. Al aumentar la cantidad de PELBD a 20%, la temperatura de fusión desciende en mayor proporción comparada con las anteriores.

En la Figura 3.55 se muestra la variación de la entalpía de fusión de la mezcla con el porcentaje de PELBD. Se verifica que los valores obtenidos para todas las concentraciones son mayores que las de sus componentes puros.

Por otra parte se puede aprecia que, a partir de 5% de PELBD, el calor de fusión disminuye al aumentar la cantidad de este polietileno lo que indica que sus ramificaciones cortas tienen un efecto notorio en la entalpía de la mezcla.

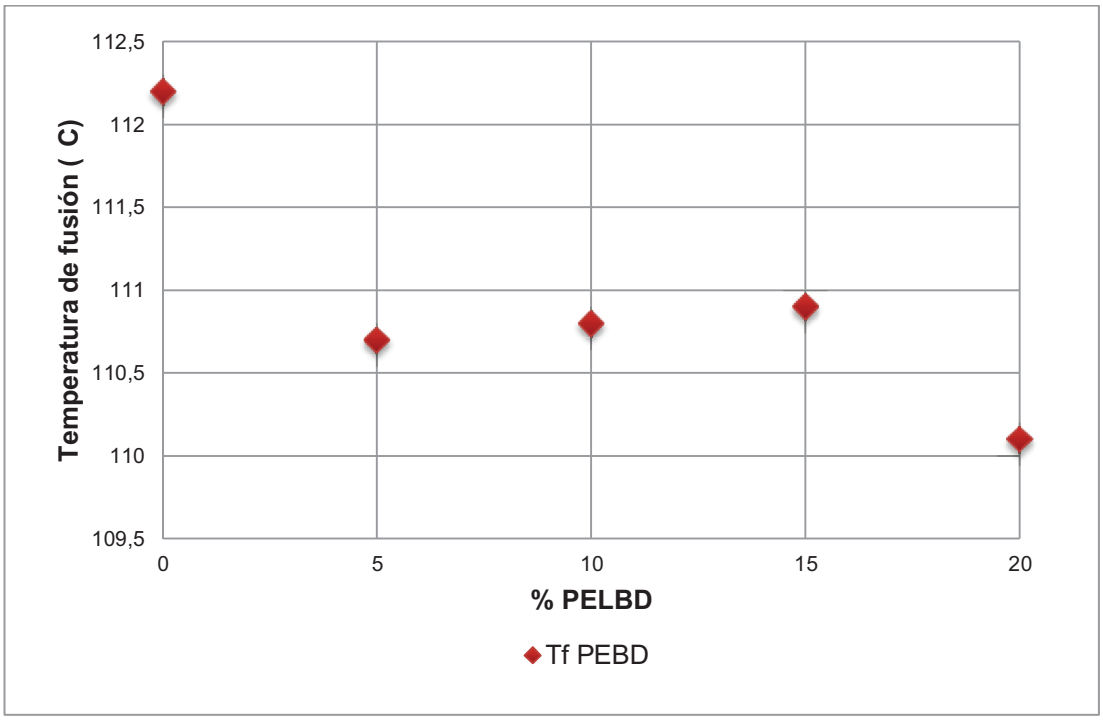


Figura 3.54. Variación de la temperatura de fusión del PEBD en la mezcla con respecto al porcentaje de PELBD

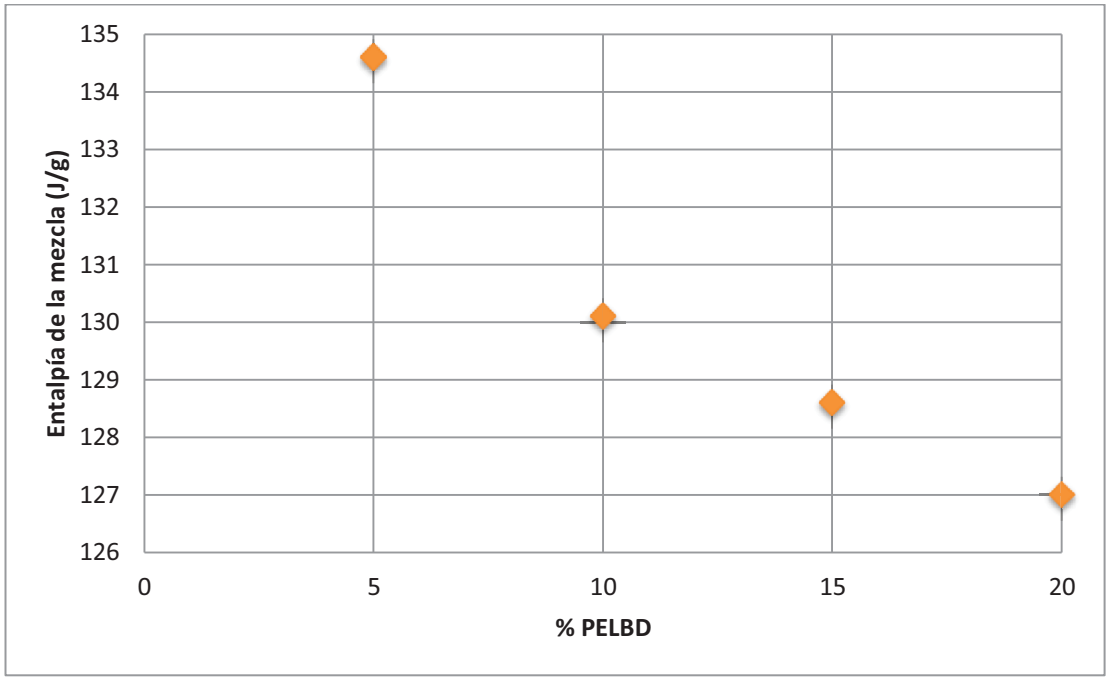


Figura 3.55. Variación de la entalpía de fusión del sistema PEBD/PELBD con respecto al porcentaje de PELBD

Finalmente en la Figura 3.56 se muestra la variación de la temperatura de cristalización con el porcentaje de PELBD. Se observa, para el PEBD, que los valores de esta transición en la mezcla son mayores que las de su componente puro lo que indica que sus cristales se formaron con un agentes nucleante que en este caso es el PELBD. Entre 5 y 20% no se aprecia una variación importante de esta temperatura.

Para el PELBD se presenta una tendencia lineal con un R^2 de 0,998 al aumentar el contenido de este polietileno en la mezcla específicamente entre 10 y 20%. A una concentración de 5%, el PELBD no muestra un pico de cristalización de acuerdo al termograma de la Figura 3.45.

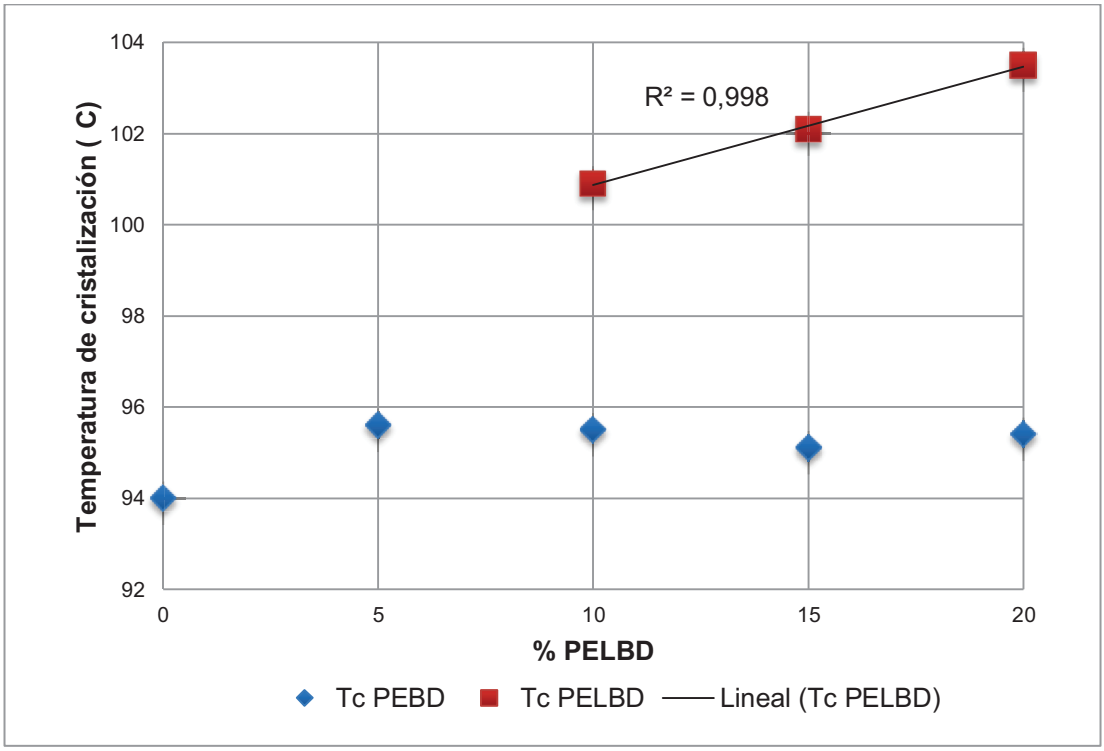


Figura 3.56. Variación de la temperatura de cristalización del sistema PEBD/PELBD con respecto al porcentaje de PELBD

3.2.3.3. Sistema PEAD/PP

Se presentan a continuación los termogramas correspondientes a las mezclas PEAD/PP donde se determinaron la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión de las cuatro concentraciones elaboradas para este sistema. Las curvas de color azul, rojo y verde pertenecen a la primera, segunda y tercera repeticiones respectivamente. Las masas de las muestras y de las celdas usadas en estos ensayos se muestran en la Tabla A VIII.5.

- PEAD/PP 95/5

En la Figura 3.57 se aprecia el termograma de la mezcla PEAD/PP 95/5 perteneciente al segundo calentamiento. Se observan dos picos: uno intenso a 131,7 ± 0,6 °C y otro de menor magnitud a 163,8 ± 0,2 °C que corresponden al PEAD y PP respectivamente. La intensidad del pico del PEAD se debe a que existe mayor cantidad de esta poliolefina en la mezcla comparada con el PP. La energía necesaria para que la mezcla funda tiene un valor de 196,4 ± 7,1 J/g.

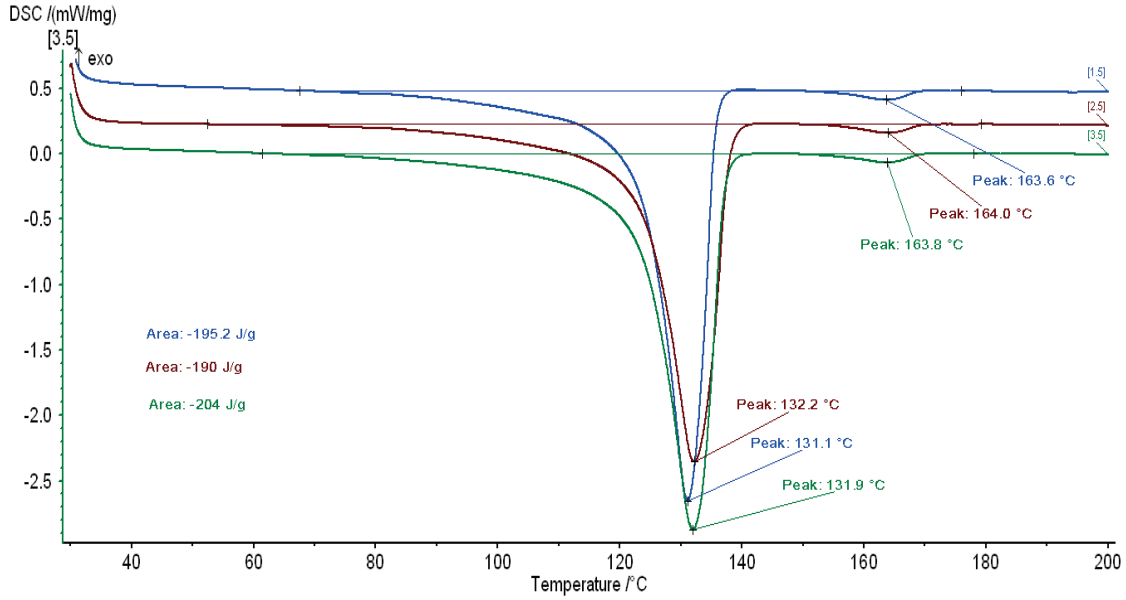


Figura 3.57. Termograma de la mezcla PEAD/PP 95/5 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

La temperatura de fusión del PEAD en la mezcla, comparada con la de su componente puro, disminuyó en 2,7 °C. Lo mismo ocurre con el PP, cuya temperatura decreció en 1,8 °C. De acuerdo a Awwad et al. (2009), este comportamiento podría originarse por la reducción del orden en las esferulitas de ambos materiales y por la acción plastificante de las moléculas de uno de ellos sobre la estructura cristalina del otro (p. 1412).

En la Figura 3.58 se aprecia el termograma del primer enfriamiento de la mezcla PEAD/PP 95/5 donde se determinó su temperatura de cristalización. Se puede observar un solo pico en las tres repeticiones con un valor de 115,3 ± 0,5 °C que sugiere un sola nucleación.

La temperatura de cristalización de la mezcla es mayor que la de sus componentes puros. Esto indica que el PP actúa como un agente nucleante al mezclarse con el PEAD lo que permite que los cristalitos en la mezcla se formen a temperaturas más altas.

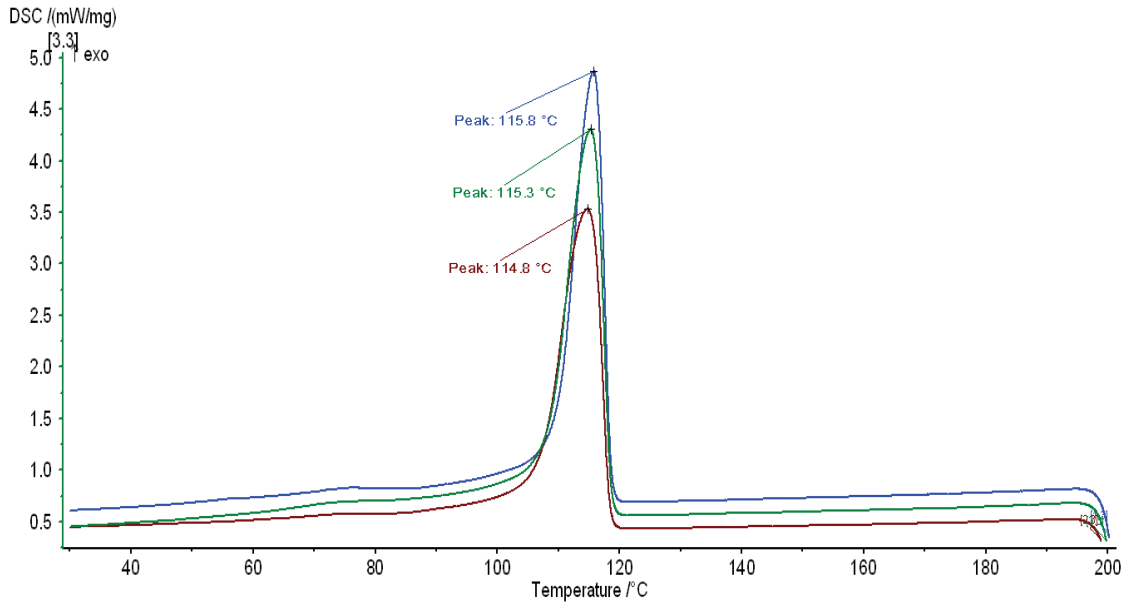


Figura 3.58. Termograma de la mezcla PEAD/PP 95/5 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

- PEAD/PP 90/10

El termograma del segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 90/10 se muestra en la Figura 3.59. Se pueden apreciar dos picos: uno intenso correspondiente al PEAD a 132,0 ± 0,2 °C y otro más pequeño perteneciente al PP a 164,0 ± 0,3 °C. De igual manera, las temperaturas de fusión de ambos materiales disminuyen en la mezcla debido a la plastificación y al orden en las esferulitas tal como se explicó anteriormente.

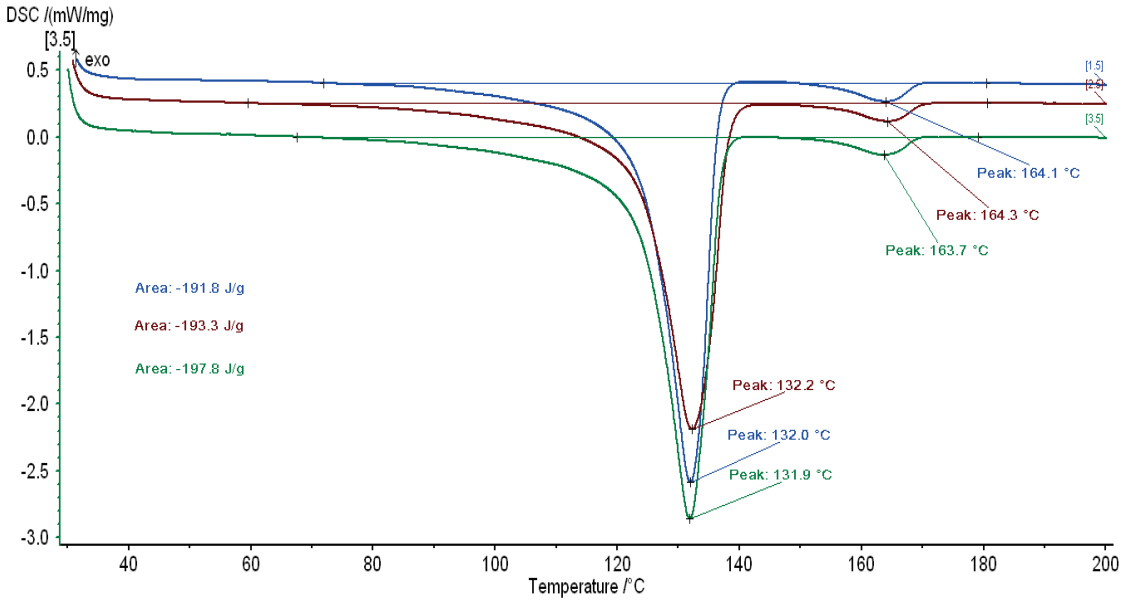


Figura 3.59. Termograma de la mezcla PEAD/PP 90/10 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

El calor de fusión de la mezcla fue de 194,3 ± 3,1 J/g. Este valor es menor que el determinado en la mezcla con 95% de PEAD, lo que sugiere que al aumentar la cantidad de PP la energía necesaria para fundir la mezcla disminuye.

En la Figura 3.60 se muestra el termograma del primer enfriamiento de la mezcla PEAD/PP 90/10. Se observa claramente un pico definido a 115,0 ± 0,2°C en las tres repeticiones que advierte una sola nucleación. Esta temperatura de cristalización es similar a la obtenida en la mezcla con PEAD/PP 95/5. Esto quiere

decir que el PP nuevamente actúa como un agente nucleante en la formación de cristalitos en la mezcla.

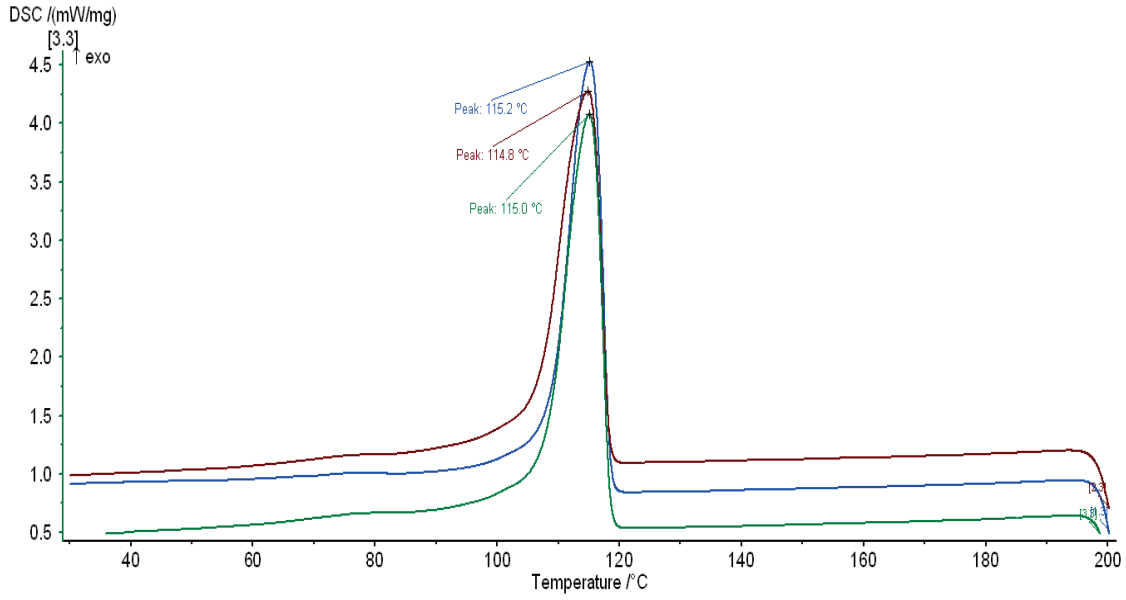


Figura 3.60 Termograma de la mezcla PEAD/PP 90/10 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

- PEAD/PP 10/90

El termograma del segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 se muestra en la Figura 3.61. Se pueden distinguir dos picos a 129,1 ± 0,4 °C y 165,1 ± 0,8 °C que corresponden al PEAD y PP respectivamente. También se aprecia que la temperatura de fusión del PP disminuye en menor proporción que la del PEAD. Esto quiere decir que los cristales de este polietileno disminuyen su tamaño en la mezcla en mayor proporción que los cristales del PP.

Además se aprecia un hombro a 148,8 ± 0,4 °C que pertenece al PP en bloque o ramdom tal como se verificó en el termograma de la Figura 3.10. El calor necesario para fundir la mezcla tiene un valor de 117,8 ± 1,5 J/g. Este dato comparado con el de las dos mezclas anteriores es mucho menor debido al mayor contenido de PP. Es decir la mezcla PEAD/PP 10/90 requiere menor energía para fundir sus cristales.

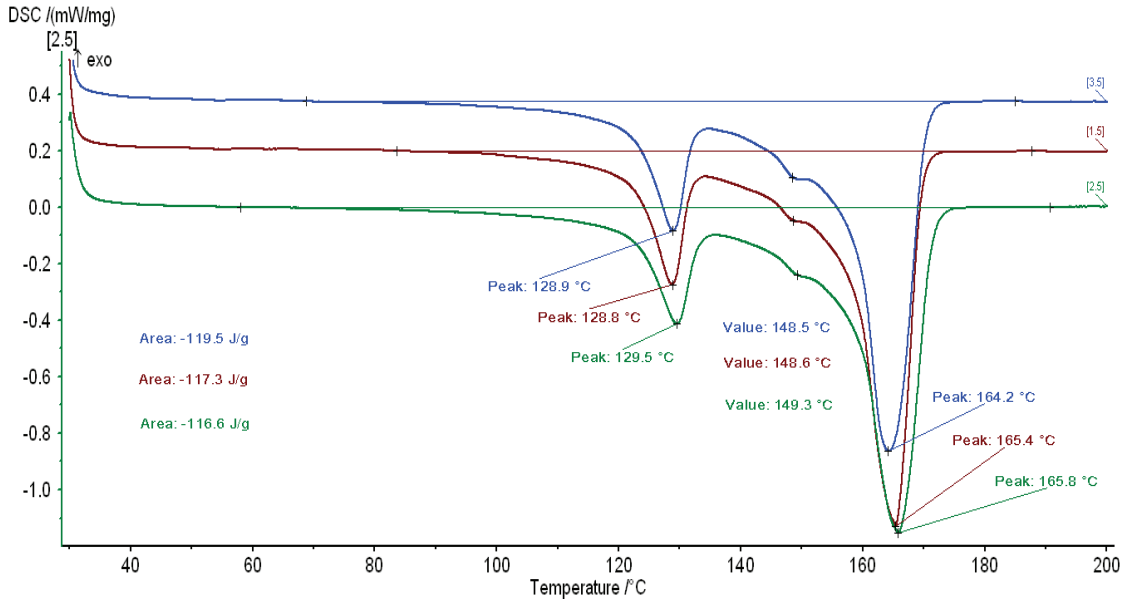


Figura 3.61. Termograma de la mezcla PEAD/PP 10/90 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

En la Figura 3.62 se muestra el termograma del primer enfriamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 donde se determinó la temperatura de cristalización.

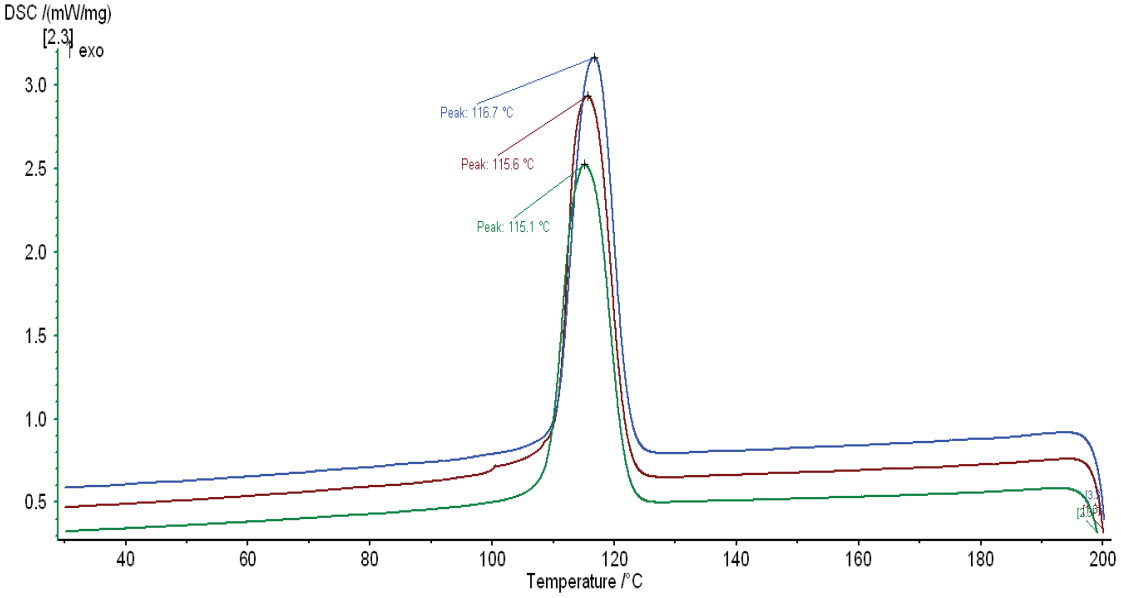


Figura 3.62 Termograma de la mezcla PEAD/PP 10/90 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

Se observa la presencia de un solo pico a 115,8 ± 0,8 °C que sugiere una sola nucleación. El valor de esta temperatura es ligeramente mayor que el determinado en las dos mezclas anteriores. Esto indica que el PEAD también actúa como agente nucleante en concentraciones bajas.

- PEAD/PP 5/95

El termograma del segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 5/95 se muestra en la Figura 3.63. Asimismo se observan dos picos: uno pequeño que pertenece al PEAD a 128,5 ± 0,1 °C y otro intenso a 165,6 ± 0,4 °C correspondiente al PP. En este caso la temperatura de fusión del PP no sufre alteraciones con respecto al valor como componente puro, mientras que esta transición en el PEAD decrece en mayor proporción que en la mezcla con 90% de PP. Según Awwad et al. (2009), en la mezcla PEAD/PP 5/95 la cristalinidad del PEAD decrece considerablemente lo que produce un descenso en su temperatura de fusión (p. 1412).

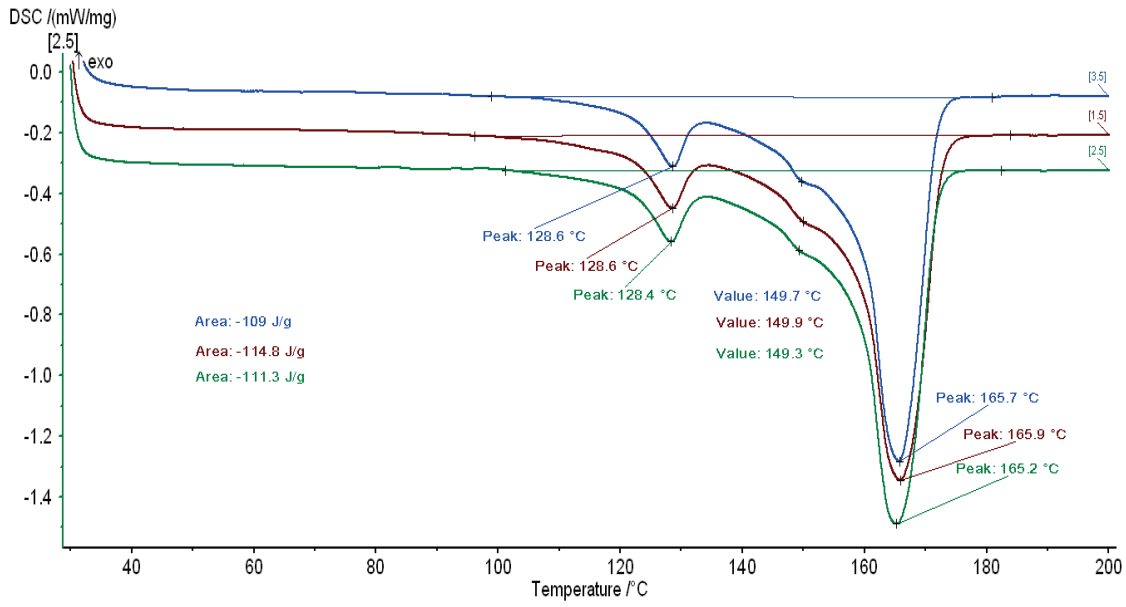


Figura 3.63 Termograma de la mezcla PEAD/PP 5/95 correspondiente al segundo calentamiento a 10 °C/min

También se puede apreciar un hombro a 149,6 ± 0,3 °C que corresponde al copolímero del PP. Por otra parte, la entalpía de fusión presenta un valor de 112,3 ± 3,0 J/g. Al existir mayor contenido de PP, la energía necesaria para fundir esta mezcla disminuye con respecto a la anterior donde la concentración de PP era de 90%.

La determinación de la temperatura de cristalización de la mezcla PEAD/PP 5/95 se muestra en el termograma de la Figura 3.64. Se observa un solo pico a 117,1 ± 0,4 °C que indica que en la mezcla se produjo una sola nucleación.

Esta temperatura es la mayor de todas las analizadas en el sistema PEAD/PP lo que sugiere que este tipo de polietileno, a concentraciones menores a 10%, actúa como un agente con mejores características nucleantes que el PP razón por la cual los cristalitos se empieza a formar a temperaturas más altas.

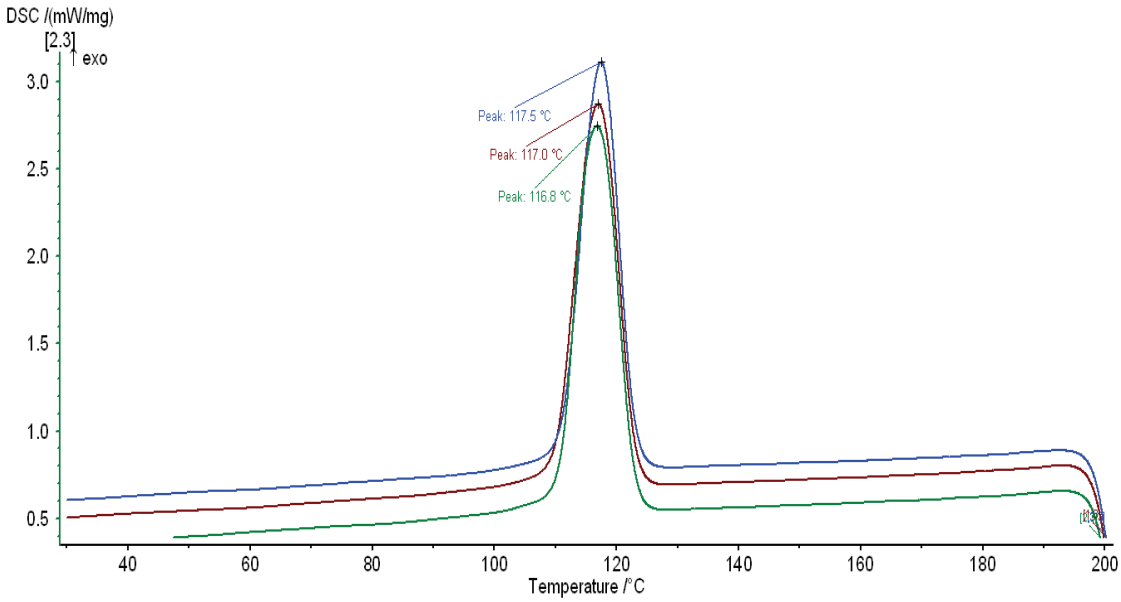


Figura 3.64 Termograma de la mezcla PEAD/PP 5/95 correspondiente al primer enfriamiento a 10 °C/min

En la Tabla 3.15 se resumen los valores de las transiciones térmicas obtenidas para el sistema PEAD/PP.

Tabla 3.15. Valores de las transiciones térmicas del sistema PEAD/PP obtenidos a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min

% PEAD	Temperatura de fusión PEAD (°C)	Temperatura de fusión PP (°C)	Entalpía de fusión (J/g)	Temperatura de cristalización (°C)
0	-	165,6 ± 1,1	108,1 ± 2,6	112,2 ± 0,7
5	128,5 ± 0,1	165,6 ± 0,4	112,3 ± 3,0	117,1 ± 0,4
10	129,1 ± 0,4	165,1 ± 0,8	117,8 ± 1,5	115,8 ± 0,8
90	132,0 ± 0,2	164,0 ± 0,3	194,3 ± 3,1	115,0 ± 0,2
95	131,7 ± 0,6	163,8 ± 0,2	196,4 ± 7,1	115,3 ± 0,5
100	134,4 ± 0,7	-	193,4 ± 2,0	113,6 ± 0,3

En la Figura 3.65 se aprecia la comparación entre los termogramas del segundo calentamiento de todas las mezclas elaboradas para el sistema PEAD/PP incluidos los componentes puros.

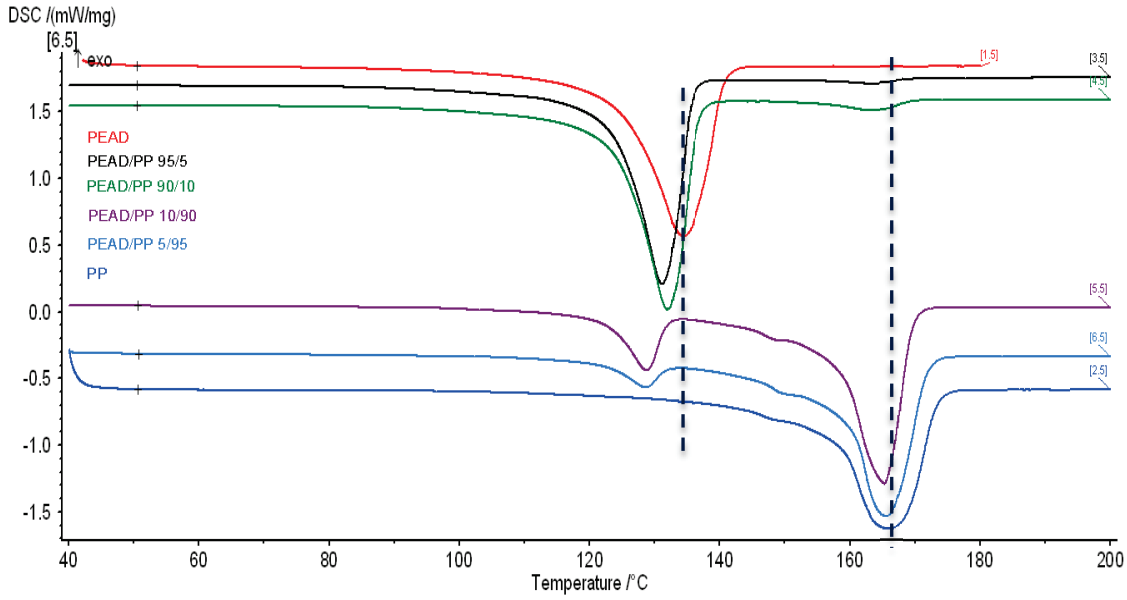


Figura 3.65. Comparación de los termogramas del sistema PEAD/PP y de sus componentes puros correspondientes al segundo calentamiento a 10 °C/min

Se distinguen dos zonas definidas por los picos fusión tanto del PEAD como del PP vírgenes. Además se observa el descenso de la temperatura en ambos materiales. Este efecto es más notorio para el PEAD. Por otra parte, también se

aprecia la variación de la intensidad de los picos de fusión con respecto a la concentración de los componentes en la mezcla.

La comparación entre los termogramas correspondientes al primer enfriamiento de todas las mezclas del sistema PEAD/PP se muestra en la Figura 3.66. Se aprecia un pico definido en todas las curvas y se puede observar que las temperaturas de cristalización de todas las mezclas son mayores que las del PP y PEAD vírgenes por lo explicado anteriormente.

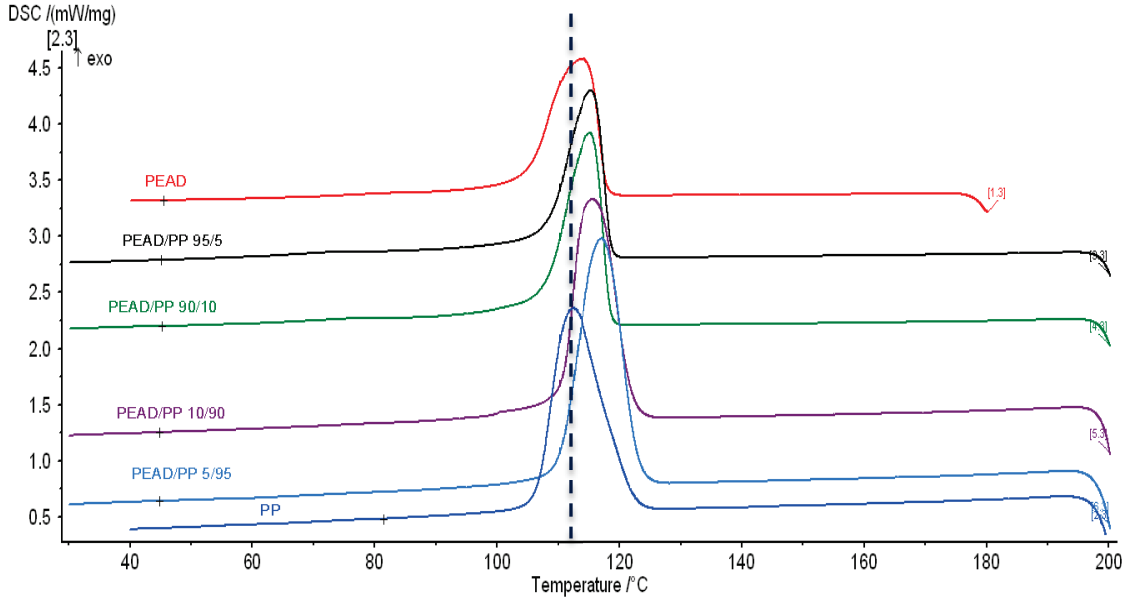


Figura 3.66. Comparación de los termogramas del sistema PEAD/PP correspondientes al primer calentamiento a 10 °C/min

En la Figura 3.67 se muestra la variación de la temperatura de fusión del PP con respecto al contenido de PEAD. Se observa que el valor de esta transición no sufre alteraciones a un 5% de PEAD con respecto al del PP puro. Al aumentar la concentración a 10% la temperatura sufre un descenso mínimo de 165,6 a 165,1 ºC. No se aprecia una tendencia marcada de los datos en este gráfico. Asimismo en la Figura 3.68 se muestra la variación de la temperatura del PEAD con respecto a su concentración en la mezcla. Se observa que los valores de esta transición térmica son menores comparados con el del PEAD puro. Además se aprecia que no existe una diferencia significativa de esta temperatura entre 90 y 95% de PEAD. No se distingue una tendencia marcada de estos datos.

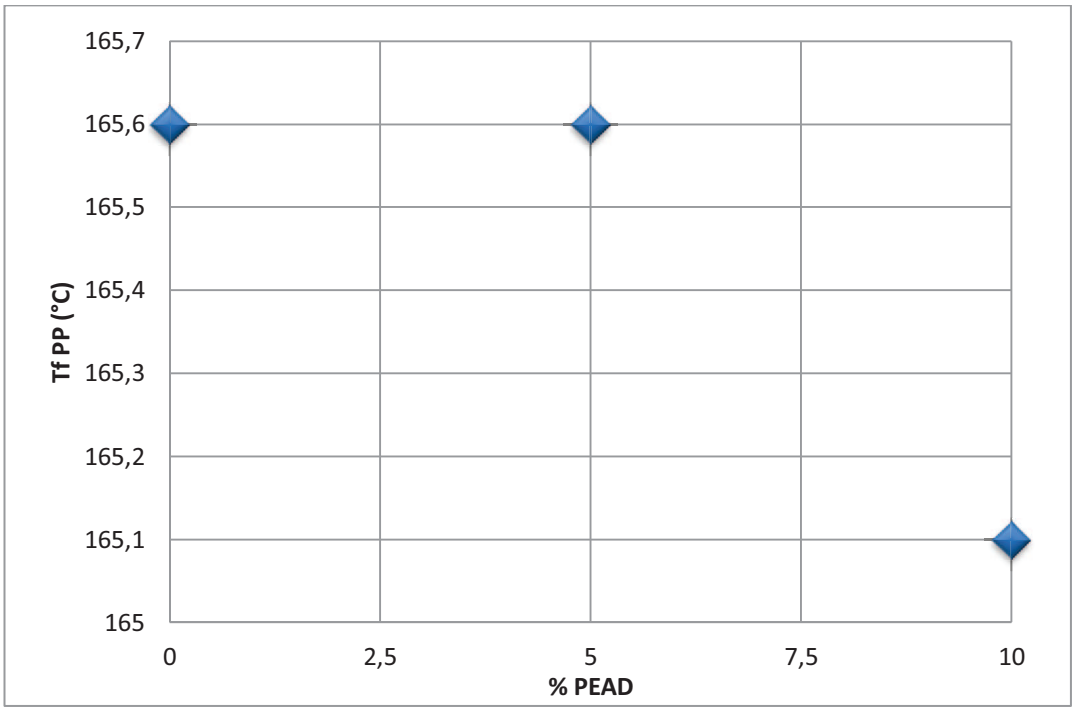


Figura 3.67. Variación de la temperatura de fusión del PP con respecto al porcentaje de PEAD

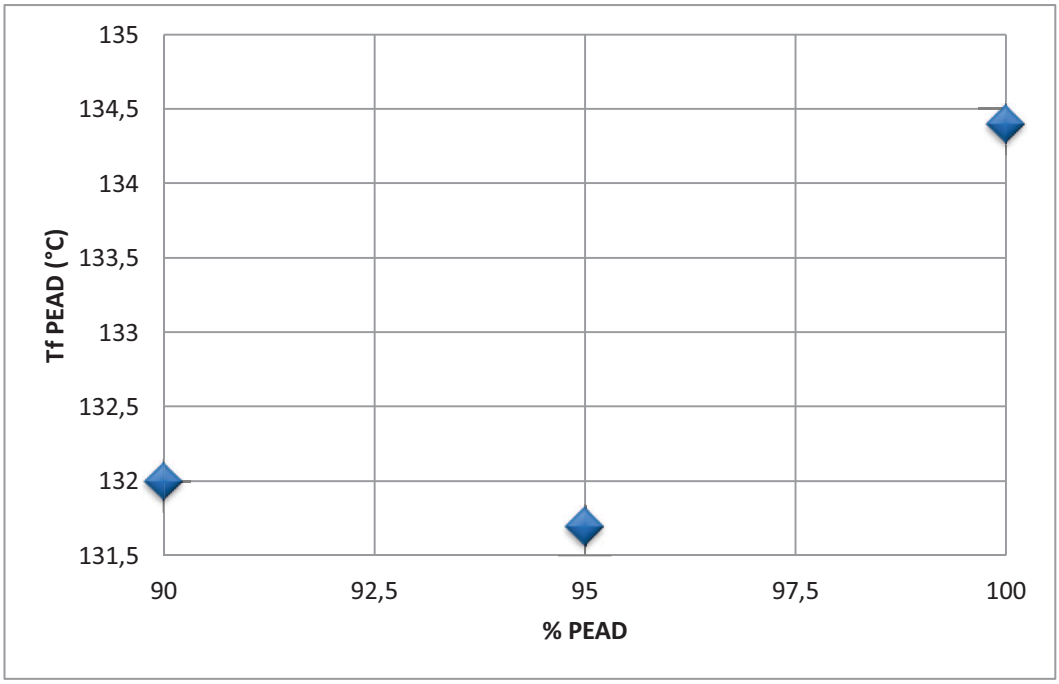


Figura 3.68. Variación de la temperatura de fusión del PEAD con respecto su contenido en la mezcla

Por otra parte, en la Figura 3.69 se muestra la variación de la entalpía de fusión de la mezcla con el contenido de PEAD para concentraciones menores a 10%. Se observa claramente una tendencia lineal con un R^2 de 0,994. Esto implica que al aumentar la cantidad de PEAD el calor de fusión se incrementa proporcionalmente.

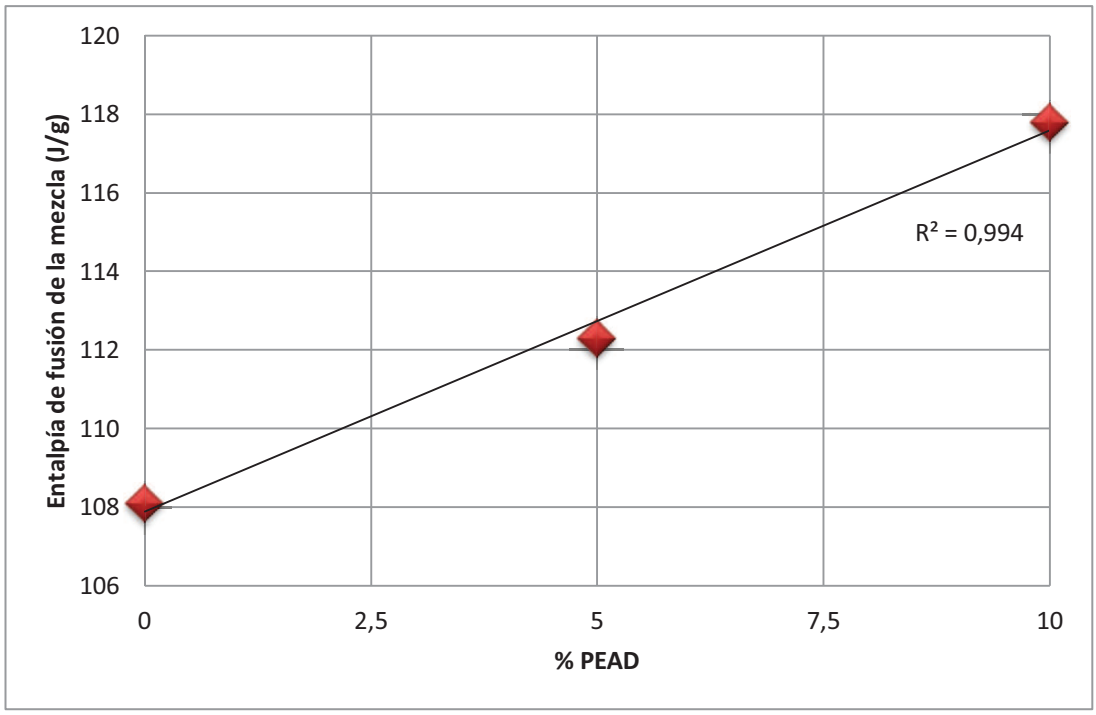


Figura 3.69. Variación de la entalpía de fusión de la mezcla con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones menores a 10%

Esto no ocurre a concentraciones mayores a 90% de PEAD tal como se muestra en la Figura 3.70. En esta zona los valores de la entalpía de la mezcla son mayores que la del PEAD puro y no se distingue una tendencia definida. El valor más alto de entalpía de fusión se registra a una concentración de 95% de PEAD.

La variación de la temperatura de cristalización de la mezcla con respecto a las concentraciones de PEAD menores a 10% se muestra en la Figura 3.71. Los valores de esta transición son mayores que la del PP que es 122,2 °C. A 5% de PEAD se observa valor máximo, con 10% la temperatura de cristalización desciende a 115,8 °C. No se observa una tendencia definida de estos datos.

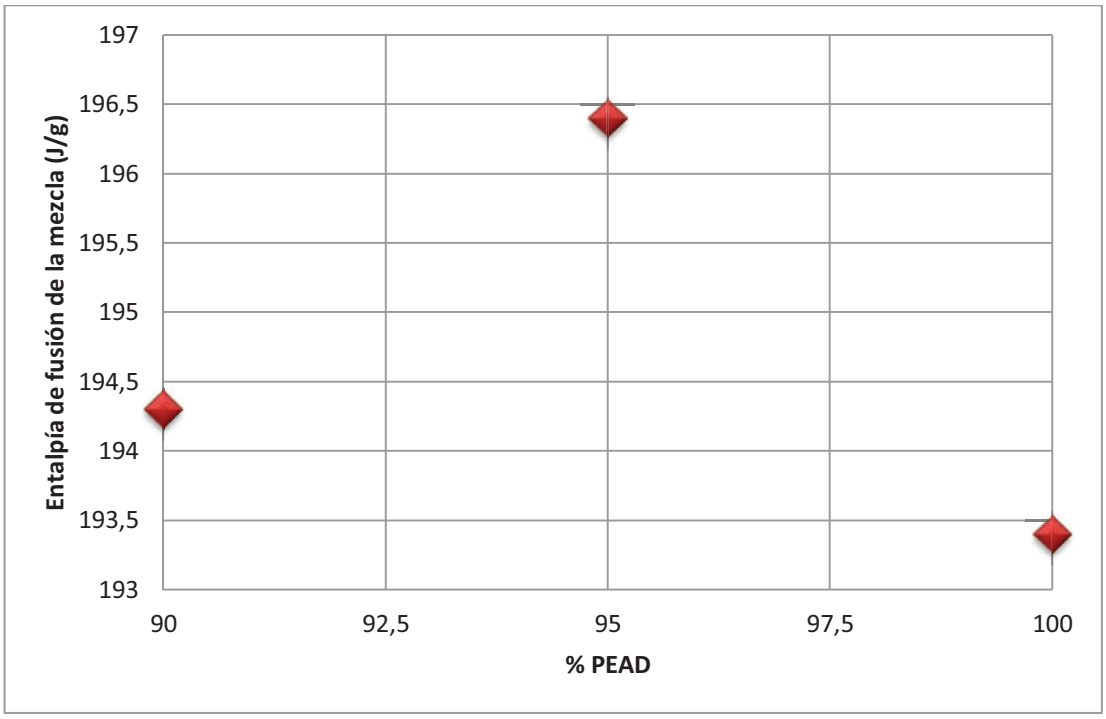


Figura 3.70. Variación de la entalpía de fusión de la mezcla con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones mayores a 90%

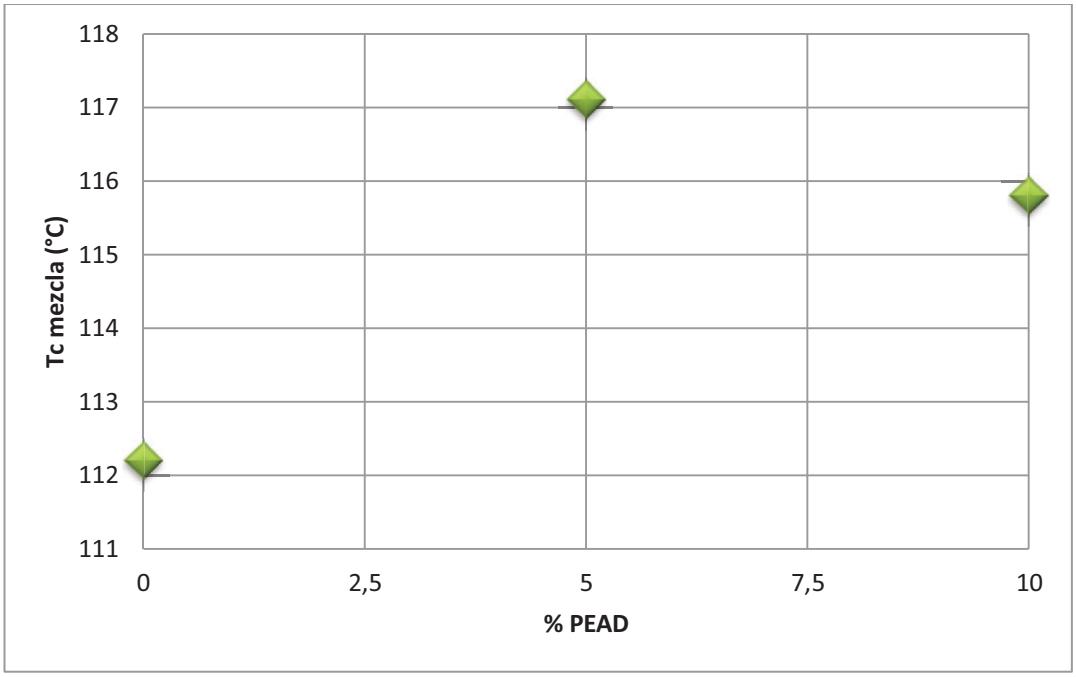


Figura 3.71. Variación de la temperatura de cristalización de la mezcla con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones menores a 10%

La variación de la temperatura de cristalización de la mezcla para concentraciones mayores a 90% de PEAD se exhibe en la Figura 3.72. Se puede observar también que los valores de esta transición son mayores que el del PEAD puro. A una concentración del 95% se aprecia el máximo valor correspondiente a 115,3 °C. Asimismo no se distingue una tendencia marcada de estos datos.

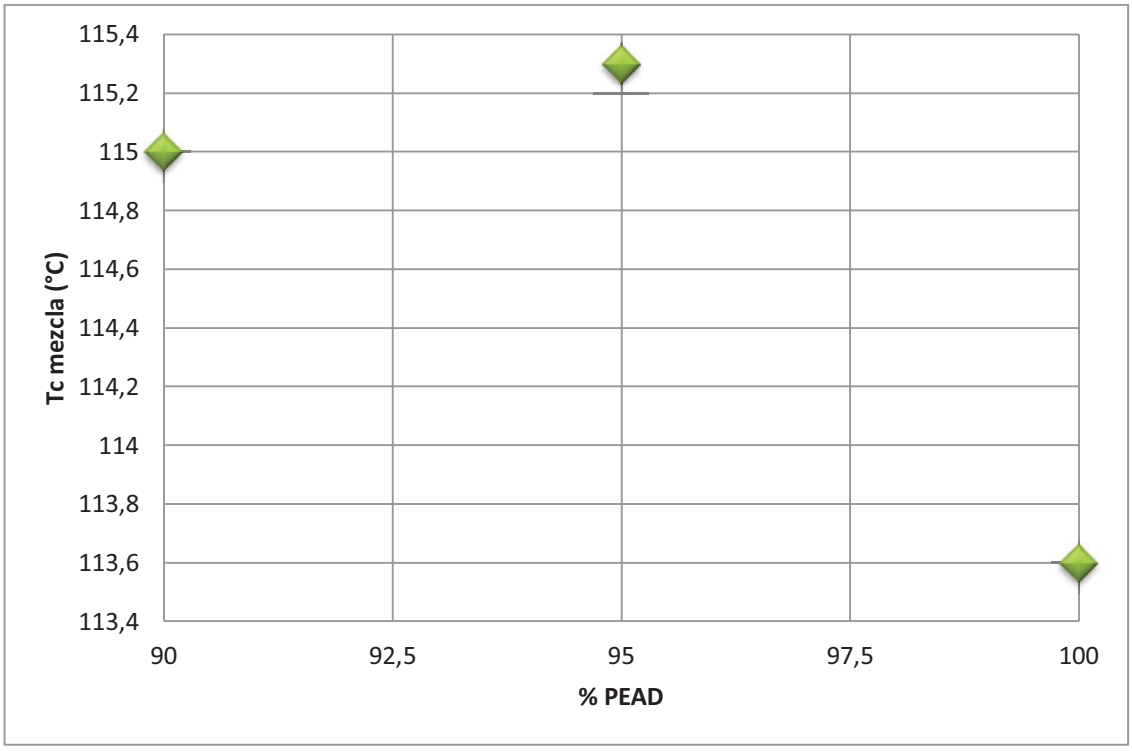


Figura 3.72. Variación de la temperatura de cristalización del PP con respecto al porcentaje de PEAD a concentraciones mayores a 90%

3.2.3.4. Determinación de la miscibilidad de los sistemas PEAD/PP y PEBD/PELBD a través de la temperatura de transición vítrea

A continuación se presentan los termogramas ampliados en las zonas donde se determinaron las temperaturas de transición vítrea de los sistemas PEAD/PP y PEBD/PELBD. Los termogramas sin ampliación se indican en el Anexo IX. En la sección 1.1.3.2 se explicó el comportamiento de esta transición para el análisis de

la miscibilidad en mezclas poliméricas. Las masas de las muestras así como de las celdas usadas en este ensayo se adjuntan en la Tabla A VIII.3.

De igual manera que para los materiales vírgenes, se utilizó el criterio de la primera derivada (curva entrecortada) para facilitar la determinación de dicha temperatura en la mezclas. Además se realizó una sola repetición debido al uso de nitrógeno líquido como sistema de enfriamiento.

- PEAD/PP 95/5

En la Figura 3.73 se muestra el termograma del segundo calentamiento a 20 °C/min de la mezcla PEAD/PP 95/5. Se aprecia una sola transición vítrea a -113,2 °C en la zona donde la primera derivada exhibe un mínimo lo que sugiere que el sistema analizado es miscible. Este comportamiento podría deberse a que las fracciones amorfas de ambos materiales forman una sola fase a una concentración de 5% de PP. Según Brostow y Kalogeras (2008), esto es lo que ocurre cuando se produce miscibilidad entre polímeros semicristalinos (p. 90).

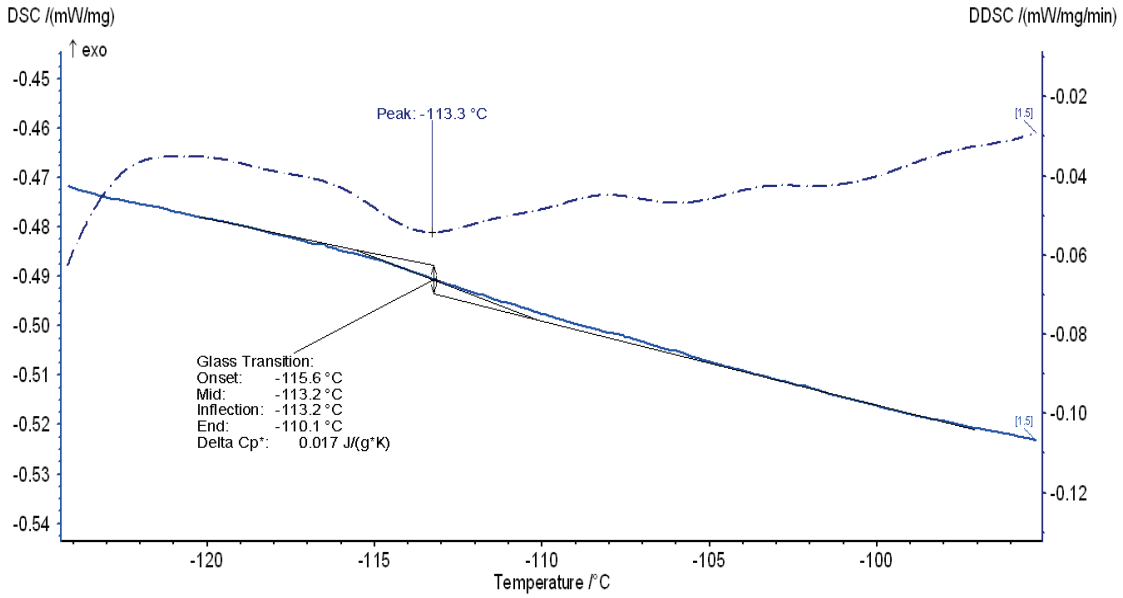


Figura 3.73. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min

Esta temperatura se encuentra entre sus componentes puros con tendencia hacia el valor del PEAD debido que constituye la poliolefina en mayor proporción en la mezcla. Se observa además ruido en la curva del termograma lo que dificultó la determinación de su Tg.

- PEAD/PP 90/10

El termograma obtenido a 20 °C/min de mezcla PEAD/PP 90/10 se muestra en la Figura 3.74. De igual manera que el anterior, se observa una sola transición vítrea a -109,4 °C por lo que esta mezcla también es miscible debido a la adecuada interacción entre las fases amorfas de sus componentes.

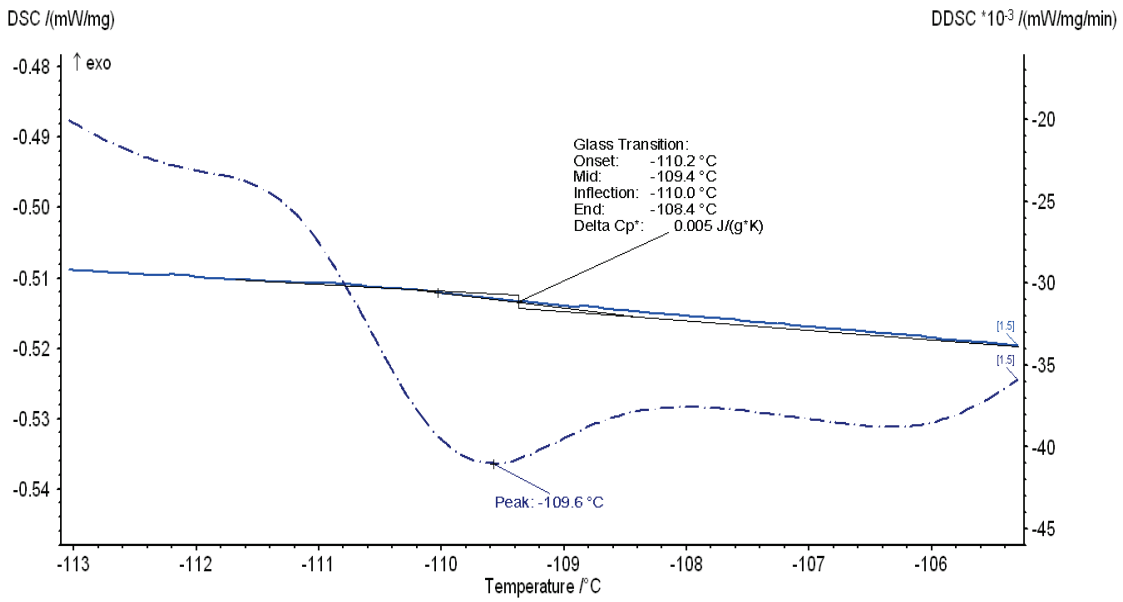


Figura 3.74. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 90/10 a 20 °C/min

La determinación de la Tg para este sistema fue más compleja debido a que existe menor fracción amorfa en la estructura de la mezcla lo que se traduce en una menor variación de la capacidad calórica con respecto al termograma de la Figura 3.73.

Asimismo se puede notar que el dato de la temperatura de transición vítrea de esta mezcla se encuentra entre el valor de sus componentes puros. Además se aprecia que el incremento de 5 a 10% de PP aumenta la Tg de la mezcla.

- PEAD/PP 10/90

Para la mezcla PEAD/PP 10/90 se encontraron dos transiciones vítreas que se muestran en los termogramas de las Figuras 3.75 y 3.76. La primera tiene un valor de -108,5 °C y la segunda -4,6 °C. Esto indica que el sistema analizado no es miscible a una concentración de 10% de PEAD. Las dos determinaciones fueron realizadas con ayuda del mínimo de la primera derivada.

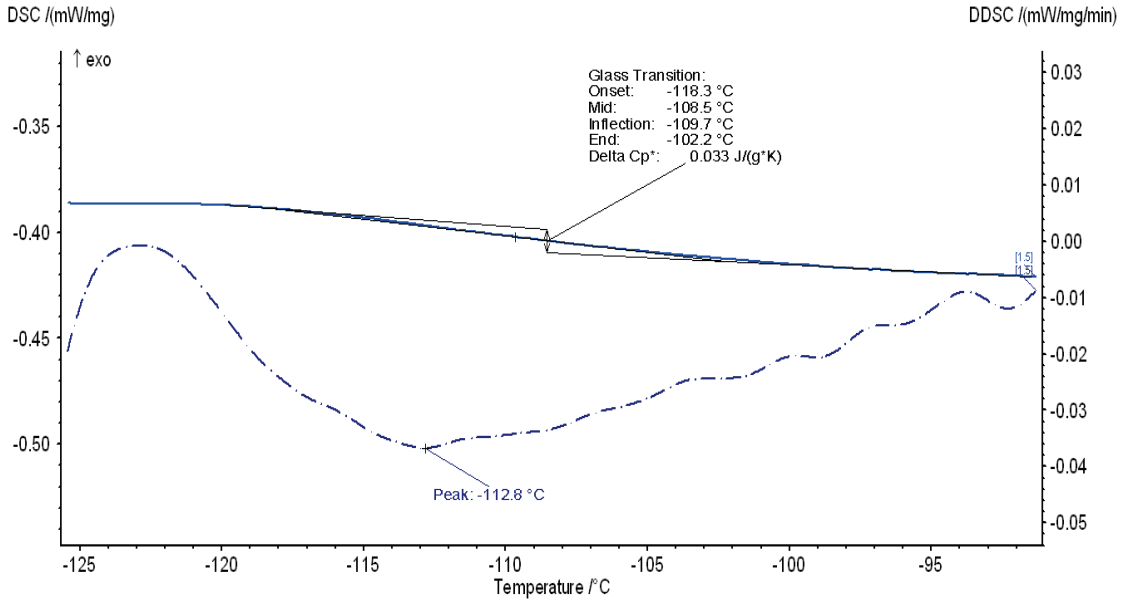


Figura 3.75. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 a 20 °C/min. Se muestra la primera transición

Se puede observar también, que el valor de esta transición térmica para el PP disminuyó de en 1,9 °C mientras que el para el PEAD la Tg se incrementó en 16,9 °C con respecto a los datos de la Tabla 3.11. Este comportamiento podría producirse, según lo explicado en el análisis de la Tg de los materiales vírgenes por Krevelen y Nijenhuis (2009), a la intensidad de las perturbaciones entre las fracciones cristalinas y amorfas del PEAD y PP (p.33).

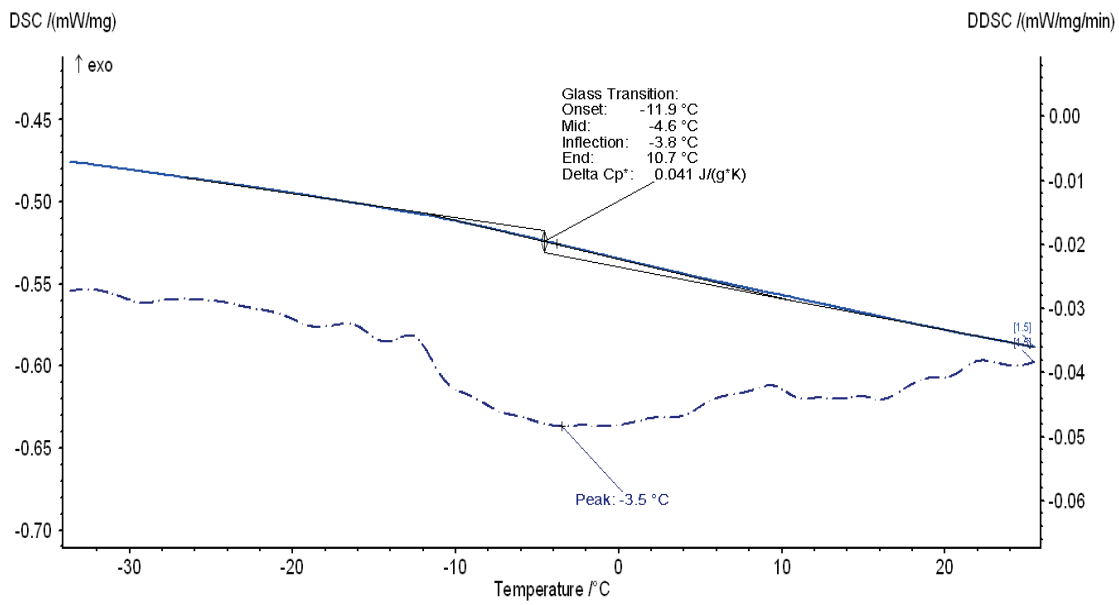


Figura 3.76. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 a 20 °C/min. Se muestra la segunda transición

- PEAD/PP 5/95

El termograma con el segundo calentamiento a 20 °C/min de sistema PEAD/PP 95/5 se presenta en la Figura 3.77. Se puede apreciar una sola transición vítrea a -4,9 °C que indica que la mezcla es miscible.

El valor de esta temperatura se encuentra en la región del PP ya que éste es el componente mayoritario en la mezcla. A 5% de PEAD se forma una sola fase en el sistema en estudio lo que sugiere una adecuada interacción de las cadenas en las regiones amorfas de ambas poliolefinas.

Por otra parte, la transición determinada se encuentra dentro del rango de sus componentes puros.

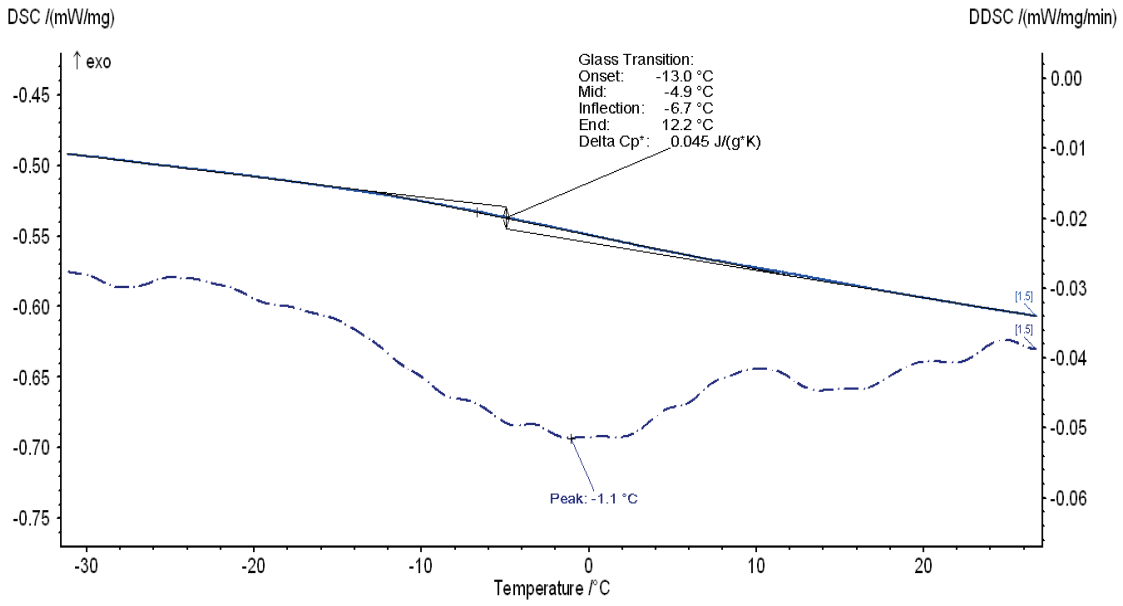


Figura 3.77. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 5/95 a 20 °C/min

- PEBD/PELBD 95/5

En la Figura 3.78 se muestra el termograma del segundo calentamiento a 20 °C/min del sistema PEBD/PELBD 95/5.

Aparentemente se observa una sola transición vítrea a -109,0 °C, pero de acuerdo a la primera derivada, se aprecian dos mínimos próximos a -107,0 °C y 102 °C que sugieren la presencia de dos transiciones. Debido a la cercanía entre los valores de T_g para el PEBD y PELBD indicados en la Tabla 3.11, se produce un solapamiento de una transición sobre otra por lo que se imposibilita su determinación. En consecuencia, este sistema es inmiscible a una concentración de 5% de PELBD.

Por otra parte, al igual que en la mezcla con 10% de PEAD, se producen interacciones de diferente intensidad entre las regiones amorfas y cristalinas de los estos polietilenos que ocasionan variaciones en la Tg con respecto al valor de sus componentes puros.

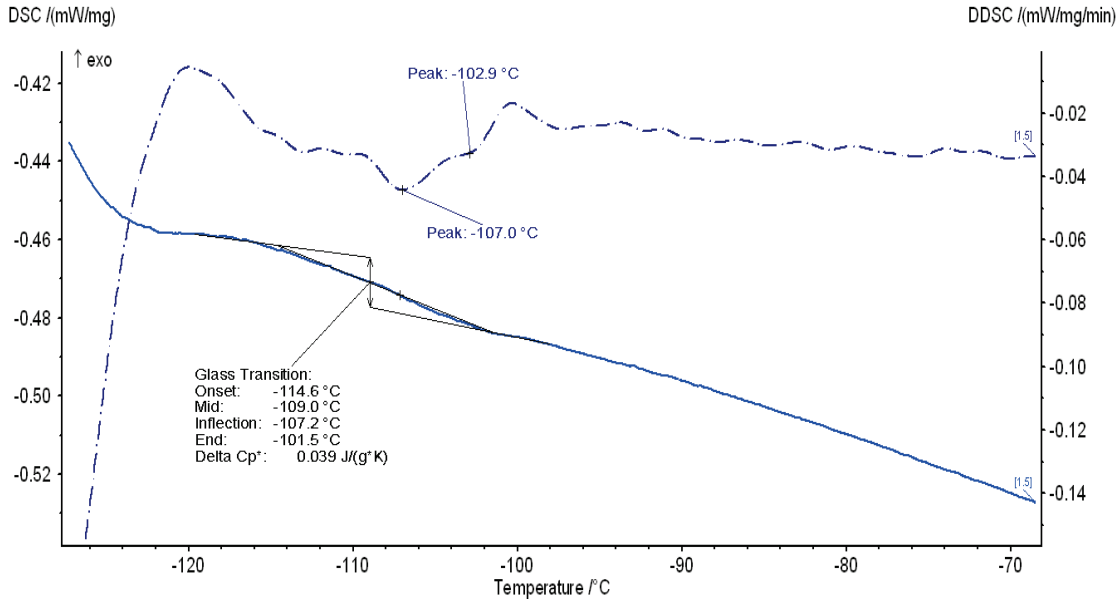


Figura 3.78. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 a 20 °C/min

- PEBD/PELBD 90/10

El termograma perteneciente al segundo calentamiento a 20 °C/min del sistema con 10% de PELBD se muestra en la Figura 3.79.

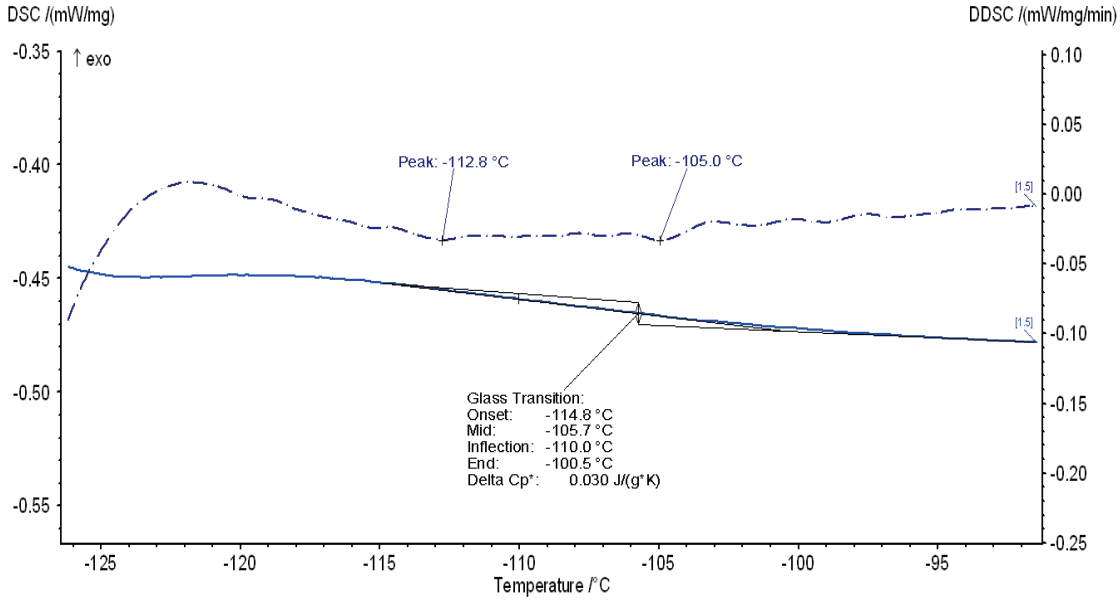


Figura 3.79. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 a 20 °C/min

De igual manera, se aprecia una sola transición a -105,7 °C que indicaría miscibilidad. No obstante, en la primera derivada se observan dos mínimos a -112,8 °C y -105,0 °C que revelan la existencia de dos transiciones vítreas. Esto indica que las temperaturas se encuentran solapadas y la mezcla en estudio es inmiscible a una concentración de 10% de PELBD

- PEBD/PELBD 85/15

En la Figura 3.80 se muestra el termograma del segundo calentamiento a 20 °C/min de la mezcla PEBD/PELBD 85/15. Al igual que en los dos casos anteriores, se observa una sola transición vítrea a -103,4 °C pero con base en la primera derivada se determinaron las dos transiciones presentes en la mezcla a -109,0 y -102,3 °C. Como resultado, a una concentración de 15% PELBD, este sistema es inmiscible.

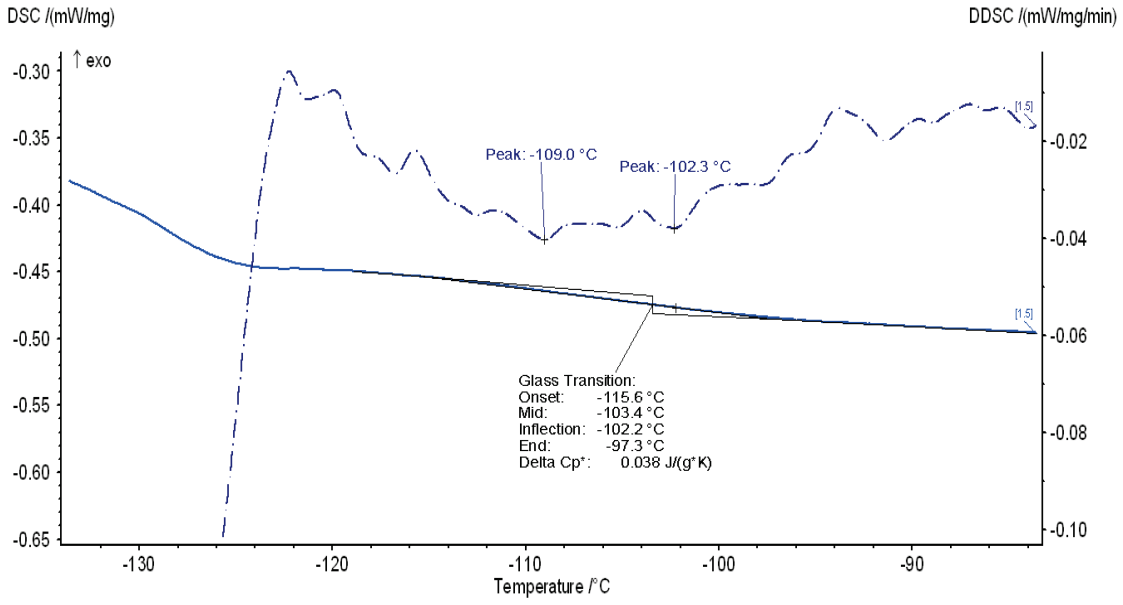


Figura 3.80. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 a 20 °C/min

La T_g del PEBD se encuentra fuera de rango de los materiales puros debido a que el PELBD ejerce mayor perturbación en las zonas amorfas del componente

mayoritario lo que provoca una disminución en la movilidad en sus cadenas. Este es un comportamiento que se da en las mezclas con 5, 10 y 15% de PELBD.

- PEBD/PELBD 80/20

Finalmente, en la Figura 3.81 se muestra la determinación de la T_g para la mezcla PEBD/PELBD 80/20. Se observa una sola transición vítrea -108,1 °C que sugiere miscibilidad. De acuerdo a la primera derivada se puede verificar que existen dos transiciones a -109,9 y -107,0 °C que indican solapamiento de las mismas. En este caso las dos temperaturas se encuentran fuera del rango de sus componentes puros.

En esta mezcla, la determinación de la T_g fue más compleja que en las anteriores debido al ruido presente en la primera derivada por lo que fue necesario un proceso de suavizado en la curva que pudo desplazar dichos valores.

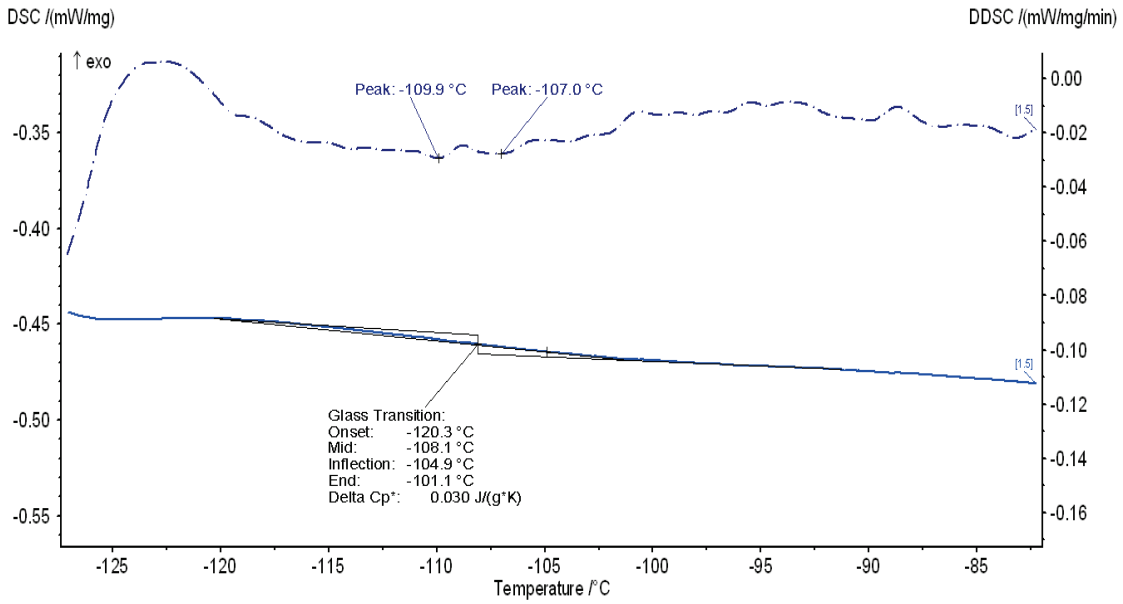


Figura 3.81. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 a 20 °C/min

En las Tablas 3.16 y 3.17 se resumen los valores de las temperaturas de transición vítrea para los sistemas PEAD/PP y PEBD/PELBD.

Tabla 3.16. Valores resumidos de la temperatura de transición vítrea para el sistema PEAD/PP obtenidos a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min

% PEAD	T_g PEAD (°C)	T_g PP (°C)	T_g Mezcla (°C)
0	-	-2,7	-
5	-	-	-4,9
10	-108,5	-4,6	-
90	-	-	-109,4
95	-	-	-113,2
100	-125,4	-	-

Tabla 3.17. Valores resumidos de la temperatura de transición vítrea para el sistema PEBD/PELBD obtenidos a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min

% PELBD	T_g PEBD (°C)	T_g PELBD (°C)
0	-106,3	-
5	-107,0	-102,9
10	-112,8	-105,0
15	-109,0	-102,3
20	-109,9	-107,0

En la Figura 3.82 se muestra la relación existente entre la temperatura de transición vítrea de la mezcla PEAD/PP con las concentraciones de PEAD mayores a 90%. Se aprecia que al aumentar el contenido de PP la Tg de la mezcla también se incrementa.

En la Figura 3.83 se muestra la variación de las temperaturas de transición vítrea del PEBD y del PELBD con respecto a la concentración del PELBD en la mezcla. Se puede observar que ambas transiciones presentan una misma tendencia, es decir, disminuye el valor de la temperatura a una concentración de 10% para luego aumentar a 15% y por último disminuir nuevamente a 20%. Esto indica que el comportamiento de esta transición en la mezcla para ambos materiales es similar.

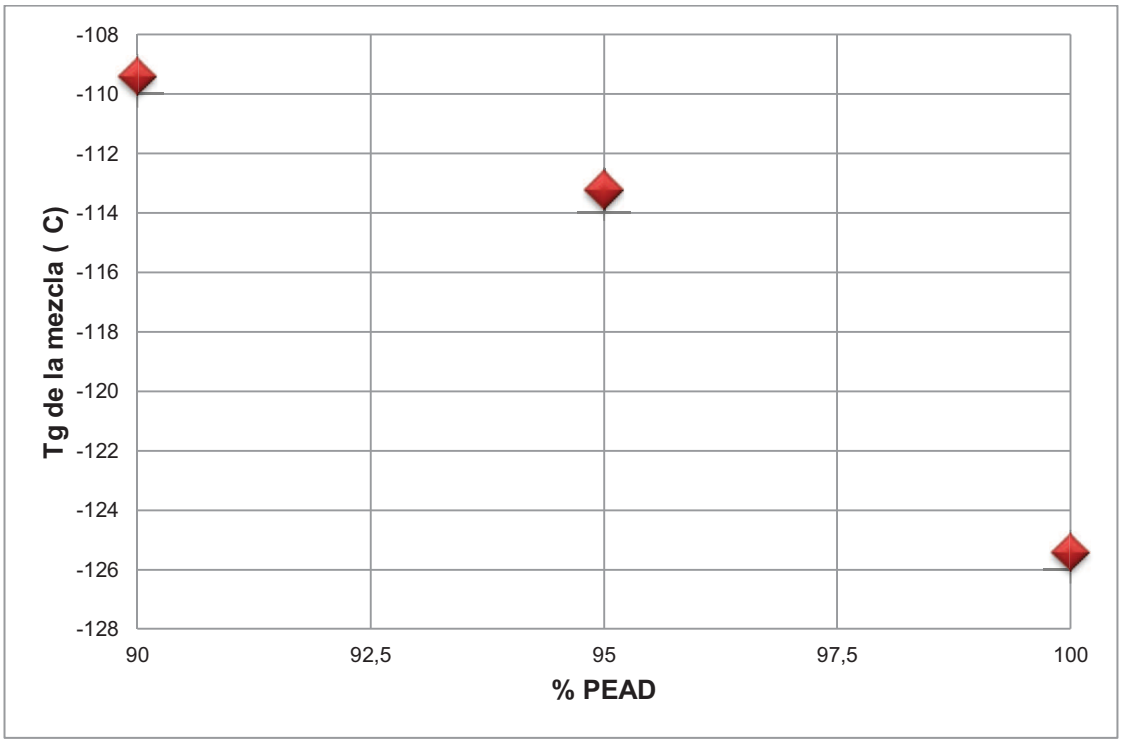


Figura 3.82. Variación de la temperatura de transición vítrea de la mezcla PEAD/PP con respecto al porcentaje de PEAD

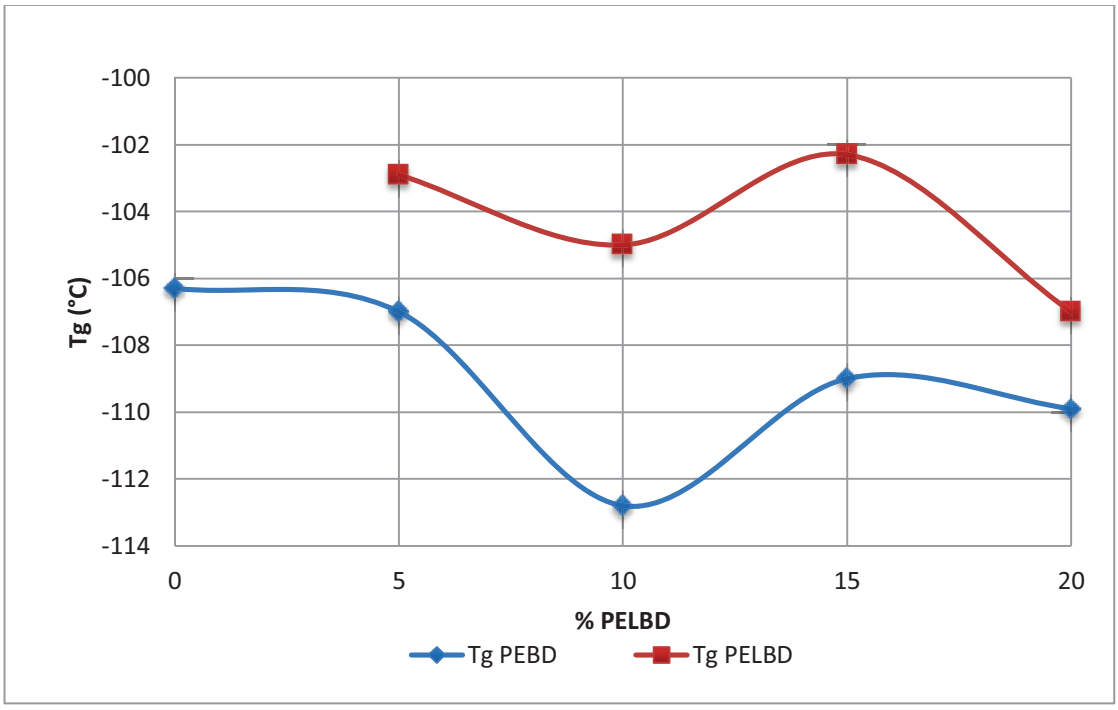


Figura 3.83. Variación de la temperatura de transición vítrea del PEBD y del PELBD con respecto al contenido de PELBD en la mezcla

3.3. APLICACIÓN DE LAS CONDICIONES DEFINIDAS PARA LA MEZCLA DE POLIOLEFINAS COMERCIALES A MATERIALES RECICLADOS

En la sección anterior se determinó que el sistema con mejores características de miscibilidad fue PEAD/PP. Esta mezcla de poliolefinas presentó miscibilidad a tres concentraciones de PP: 5, 10 y 95%. A 90%, la mezcla fue inmiscible. En otras palabras existe mayor probabilidad de encontrar una adecuada interacción entre las fases amorfas y por ende miscibilidad a concentraciones menores a 10% de PP.

Si se comparan los termogramas de T_g de las mezclas PEAD/PP 95/5 y 90/10 de las Figuras 3.73 y 3.74 respectivamente, se observa que la primera tiene una mejor definición y exhibe una mayor variación de la capacidad calórica que la mezcla con 10% de PP. Esto implica que las interacciones de las fases amorfas en la mezcla con 5% de PP son mayores que a 10% de este componente. Esta constituye la razón fundamental por la que se seleccionó la mezcla PEAD/PP 95/5 como la de mejores condiciones de miscibilidad

3.3.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS Y DENSIDAD

En la Tabla 3.18 se muestra el contenido de material inorgánico presente en el PEADD y PP reciclados. De acuerdo a la norma ASTM 5630-06 si los valores son menores al 1% se debe reportar en ppm.

Tabla 3.18. Contenido de material inorgánico en las poliolefinas recicladas obtenido con base en la norma ASTM 5630-06

Poliolefina	Contenido de inorgánicos
PEAD	1,569 ± 0,001 %
PP	1 067 ± 15 ppm

Se observa que las poliolefinas recicladas exhiben un mayor contenido de inorgánicos comparadas con los valores de las poliolefinas comerciales de la Tabla 3.1. Aunque esta cantidad continúa en valores bajos podría afectar el movimiento de las cadenas en la mezcla con materiales reciclados y producir nucleaciones heterogéneas.

El incremento en el contenido de inorgánicos de estos materiales podría deberse a la adición de estabilizantes y pigmentos durante el procesamiento que permiten la obtención de productos terminados.

Por otra parte, en la Tabla 3.19 se muestran las densidades experimentales del PEAD y PP reciclados

Tabla 3.19. Densidades experimentales de las poliolefinas comerciales obtenidas con base en la norma ASTM D 792-08 con alcohol etílico absoluto como líquido de inmersión

Poliolefina	Densidad (g/cm^3)	Temperatura (°C)
PEAD	0,9506 ± 0,0011	21,0
PP	0,9073 ± 0,0017	21,0

Estos valores son ligeramente mayores que los obtenidos para las poliolefinas comerciales pero se encuentran dentro del rango bibliográfico especificado en la Tabla 3.4 para materiales vírgenes. Esto podría indicar que existen ligeras modificaciones en las cadenas de las poliolefinas recicladas con respecto a las comerciales.

3.3.2. ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS

En la Figura 3.84 se exhibe el espectro correspondiente al PP reciclado entre 4 000 y 450 cm^{-1}. Se observan bandas a 973,01, 1 167,13 y 1 377,77 cm^{-1}. De acuerdo a Scheirs (2000), éstas son características del polipropileno. Si se amplía el gráfico en el rango comprendido entre 745 y 705 cm^{-1} se pueden apreciar dos

bandas a 719,60 y 729,71 cm^{-1} que corresponden a un polipropileno copolímero en bloque tal como se muestra en la Figura 3.85 (pp. 152, 178).

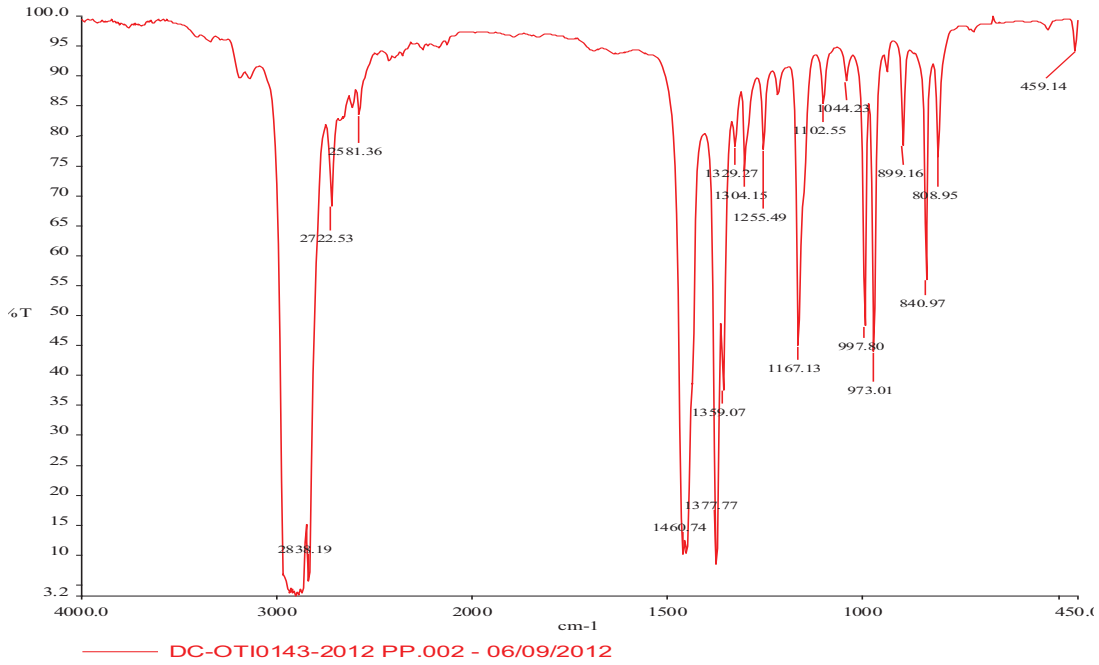


Figura 3.84. Espectro del polipropileno entre 4000 y 450 cm^{-1}

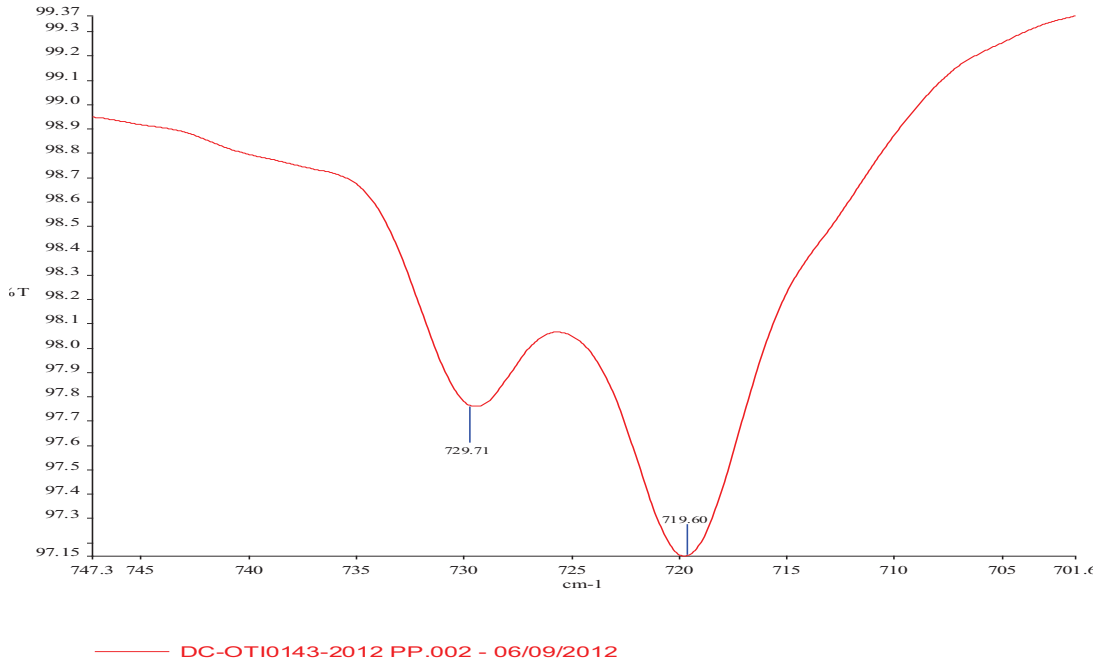


Figura 3.85. Espectro ampliado del polipropileno entre 745 y 705 cm^{-1}

En las Figuras 3.86 y 3.87 se aprecian los espectros del PEAD entre 4 000-450 cm^{-1} y 1 400-1 320 cm^{-1} respectivamente.

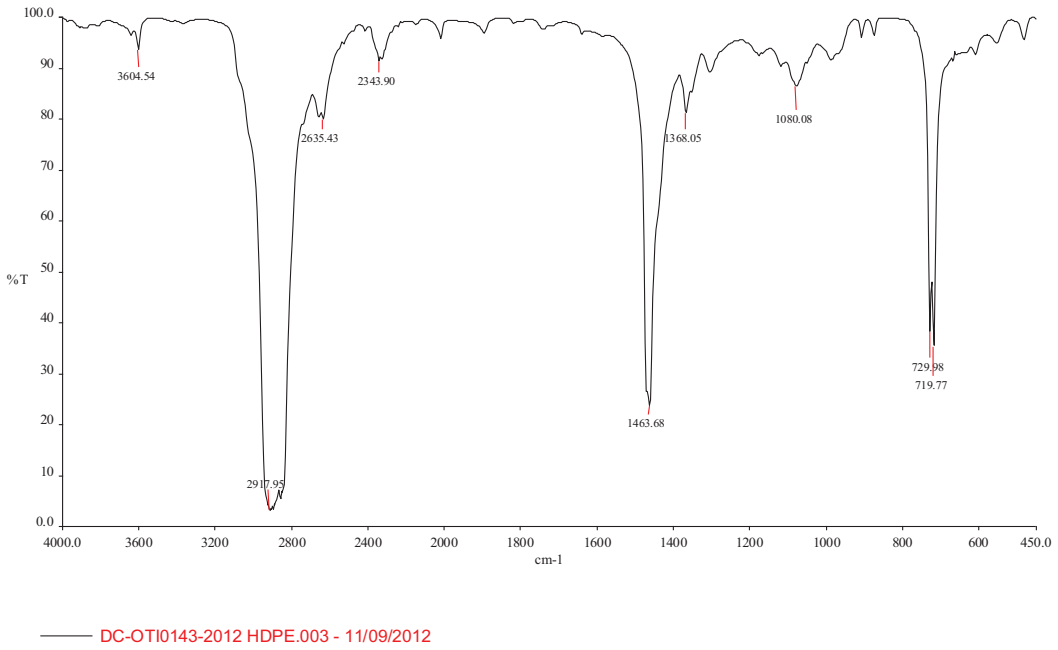


Figura 3.86. Espectro del PEAD entre 4000 y 450 cm^{-1}

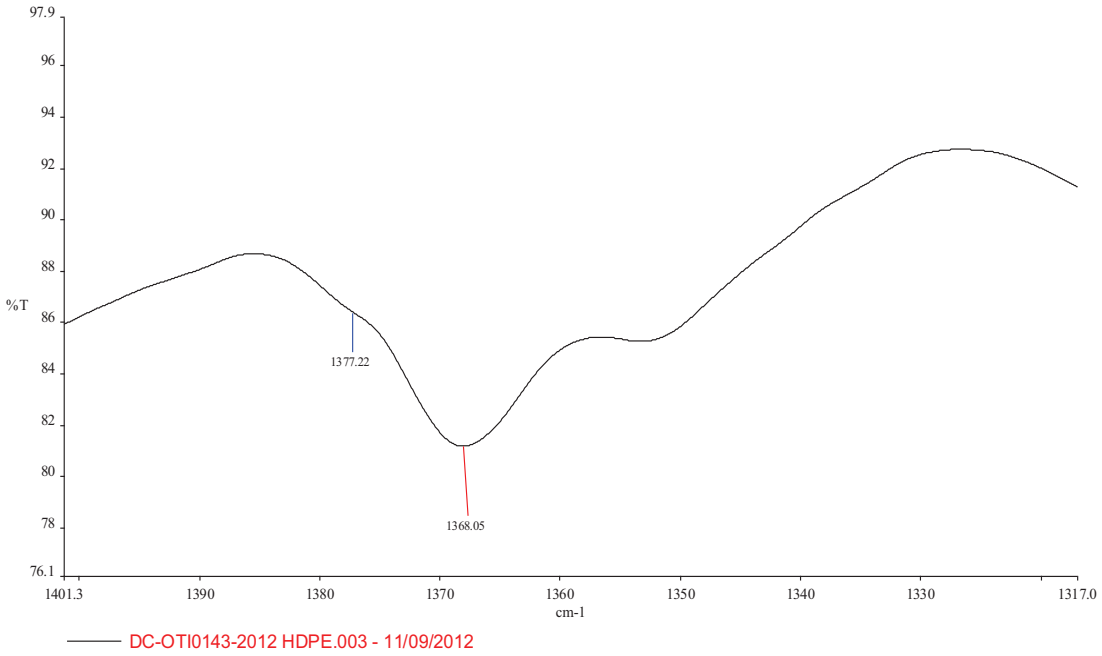


Figura 3.87. Espectro del PEAD entre 1400 y 1320 cm^{-1}

Se distinguen, en la Figura 3.86, bandas a 2 917,95, 1 463,68, 729,98 y 719,77 cm^{-1} que son propias del polietileno. De igual forma, si se amplía el espectro, se observa un pico intenso a 1 368 cm^{-1} y otro muy leve a 1 377 cm^{-1} tal como se observa en la Figura 3.87. Estos dos picos son característicos de un polietileno de alta densidad (Koenig, 1999, p. 92; Scheirs, 2000, p. 152).

3.3.3. EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN Y DISTRIBUCIÓN

En la Figura 3.88 se aprecia la comparación entre las curvas de los reogramas de la mezcla PEAD/PP 95/5 con materiales vírgenes y reciclados. Se aprecia una diferencia aproximada de 9 Nm entre los torques en la zona de estabilidad.

Esto indica que procesar materiales reciclados requiere mayor esfuerzo para lograr una adecuada homogenización comparada con poliolefinas vírgenes.

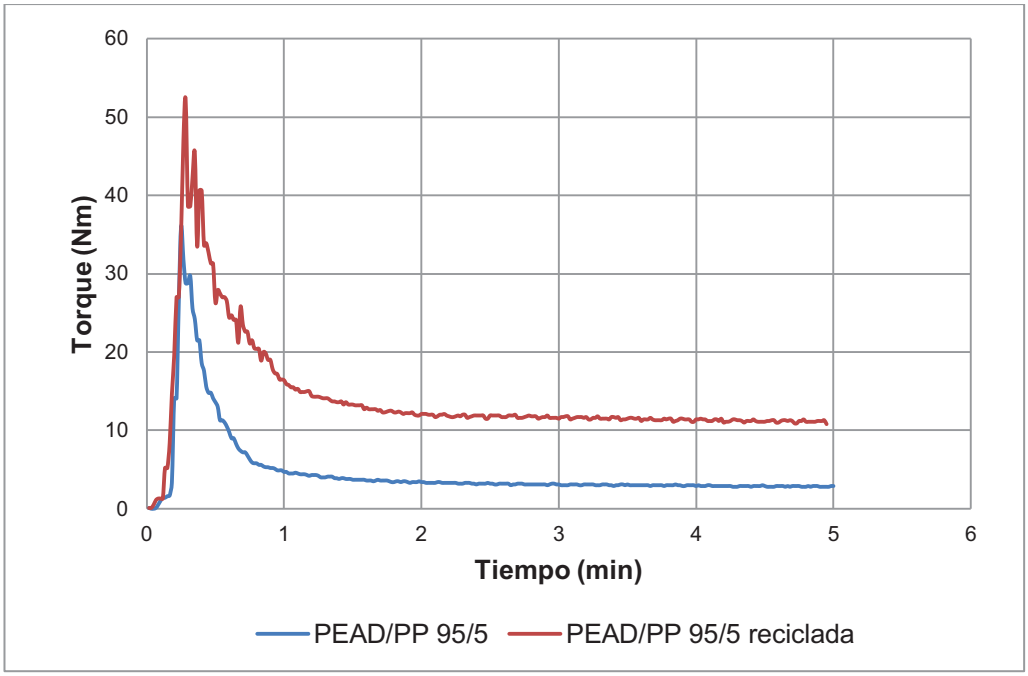
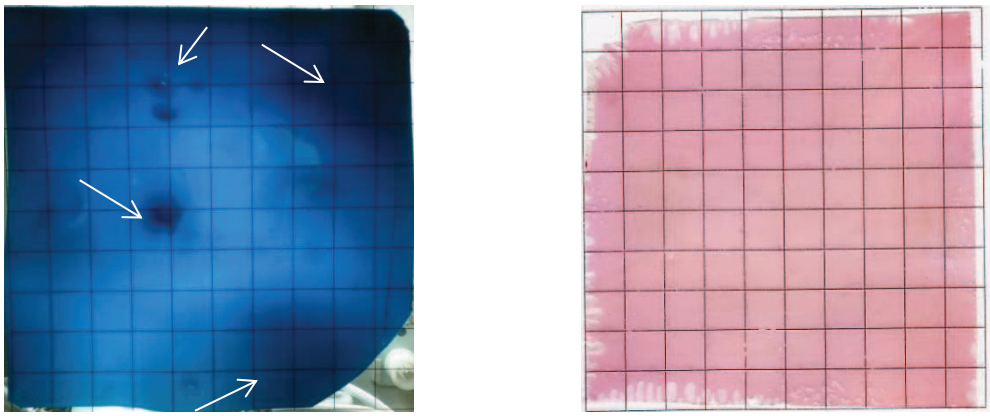


Figura 3.88. Reograma de las mezclas PEAD/PP 95/5 reciclada y con materiales vírgenes a 180 °C y a 40 rpm

En la Figura 3.89 se muestra la probeta de la mezcla reciclada del sistema PEAD/PP 95/5 la misma que es comparada con el estándar “d”. Se aprecian claramente zonas donde existen diferencias en la coloración de la probeta lo cual podría deberse a una mayor acumulación de poliolefinas en dichas regiones. Se podría pensar que no existe buena dispersión ni distribución, peros si este fuese el caso, no se observaría el color azul en toda la probeta de la mezcla reciclada.



Mezcla Reciclada PEAD/PP 95/5 Estándar “d”

Figura 3.89. Probeta de la mezcla reciclada PEAD/PP obtenida a 210 °C y 4 000 psi

3.3.4. DENSIDAD DEL ESTADO FUNDIDO DE LA MEZCLA RECICLADA

La densidad de la mezcla reciclada en el estado fundido se presenta en la Tabla 3.20. Esta determinación fue necesaria para el posterior dimensionamiento de la extrusora. Se observa que este valor es menor que el de la mezcla en estado sólido que fue 0,9484 g/cm^3 de acuerdo a la Tabla A VI.7.

Tabla 3.20. Densidad del estado fundido de la mezcla PEAD/PP 95/5 obtenida a 210 °C y con una carga de 2,16 kN

Mezcla	Densidad (g/cm^3)
PEAD/PP 95/5	0,740 ± 0,046

3.3.5. ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS POLIOLEFINAS Y DE LA MEZCLA RECICLADAS

En esta sección se muestras los termogramas de los análisis térmicos tanto de los poliolefinas recicladas como de la mezcla PEAD/PP 95/5. Las masas de las muestras y de las celdas usadas se indican en la Tabla A VIII.7.

- PEAD reciclado

En la Figura 3.90 se presenta el termograma correspondiente al segundo calentamiento de las curvas del PEAD reciclado y virgen. Para el primer material se observa un pico ancho con un valor de 134,0 °C y un calor de fusión de 172,0 J/g. Si se comparan estos datos con los del PEAD virgen se observa que la temperatura de fusión es ligeramente mayor mientras que la entalpía disminuyó notablemente. Este efecto podría deberse a los diferentes tamaños de los cristales en cada material y a la posible degradación del PEAD reciclado.

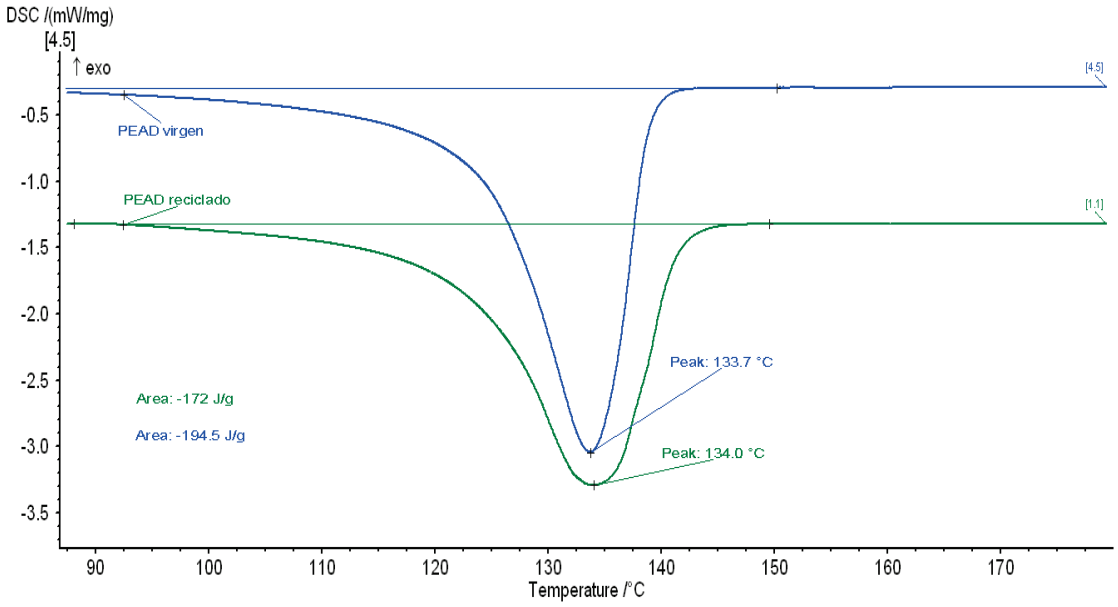


Figura 3.90. Termograma correspondiente al segundo calentamiento del PEAD reciclado a 10 °C/min

- PP reciclado

La comparación de las curvas de los termogramas entre el PP virgen y reciclado se muestra en la Figura 3.91. No existe diferencia entre el calor de fusión para ambos materiales. Sí se observa una ligera disminución de la temperatura de fusión del PP reciclado que podría atribuirse a la disminución del tamaño de sus cristales por efectos de la degradación.

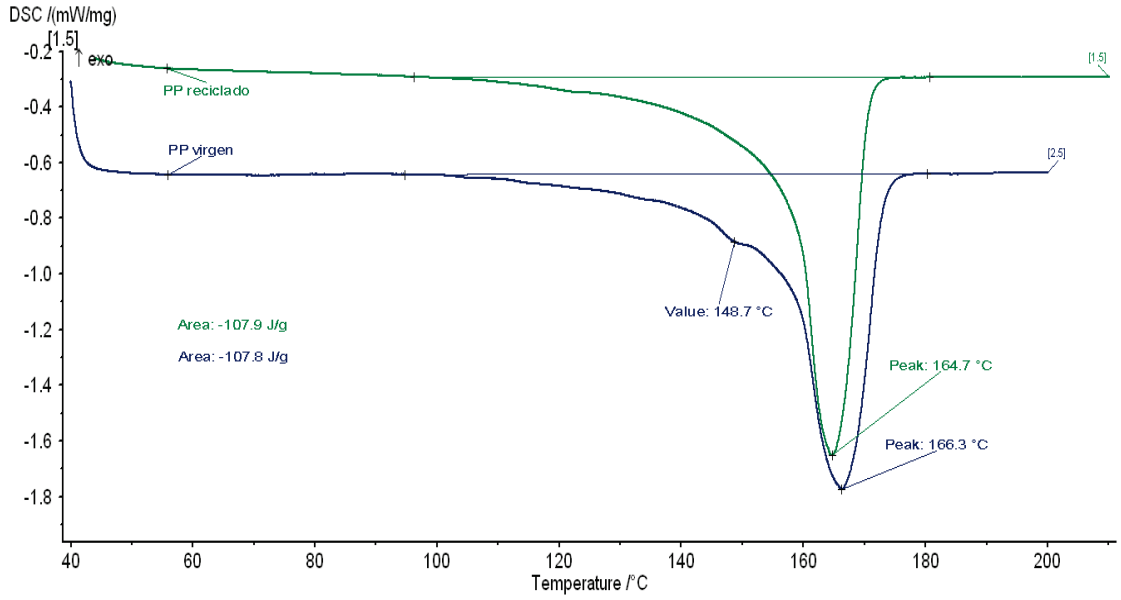


Figura 3.91. Termograma correspondiente al segundo calentamiento del PP reciclado a 10 °C/min

- Mezcla reciclada PEAD/PP 95/5

En la Figura 3.92 se aprecia también el termograma con la comparación de las curvas entre los sistemas PEAD/PP 95/5 con materiales vírgenes y reciclados. Se puede observar una ligera disminución del calor de fusión de la mezcla reciclada con respecto a la virgen. Asimismo, se aprecia que las temperaturas de fusión del PEAD y del PP en el sistema con reciclados son levemente mayores comparadas con el sistema de materiales vírgenes.

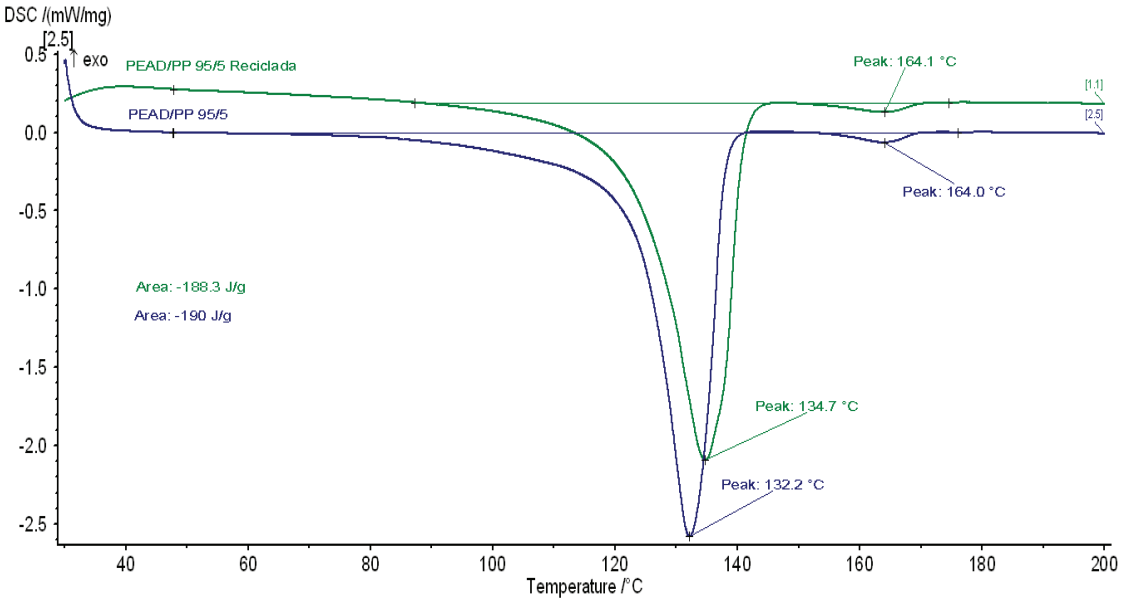


Figura 3.92. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 a 10 °C/min

Finalmente, en la Figura 3.93 se muestra el termograma del segundo calentamiento a 20 °C/min del sistema PEAD/PP 95/5 con materiales reciclados.

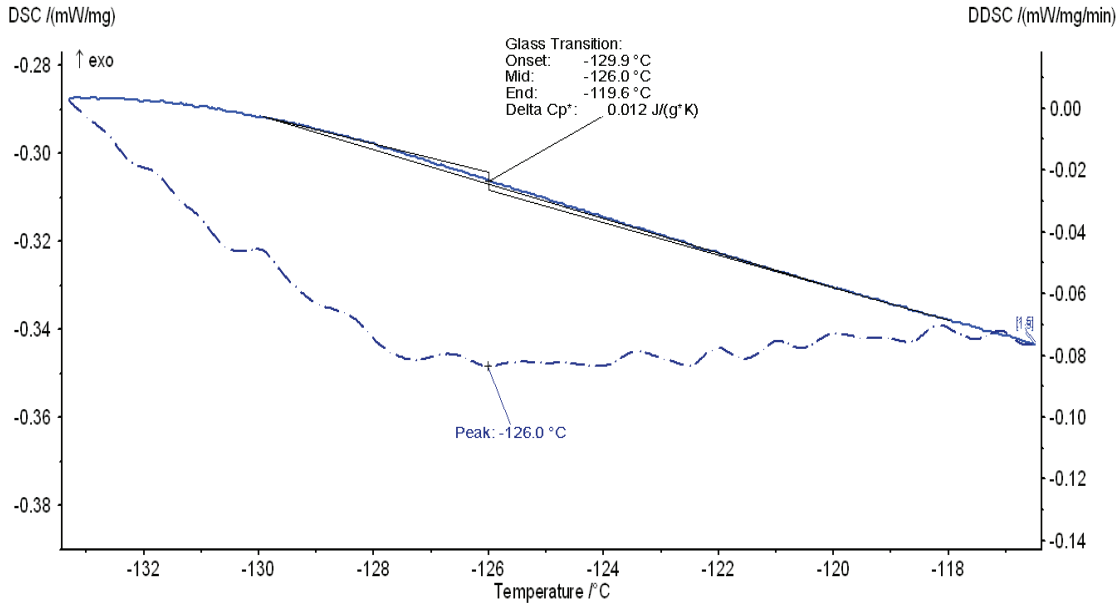


Figura 3.93. Termograma ampliado correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min

Se determinó una sola transición vítrea a -126,0 °C que indica que la mezcla en estudio es miscible. Este valor es menor que el obtenido para la mezcla con materiales vírgenes que fue -113,2 °C. Este comportamiento podría atribuirse a que los materiales reciclados sufrieron cierta degradación que afectó su peso molecular y esto provocó un descenso en la Tg de la mezcla.

En la Tabla 3.21 se resumen las transiciones térmicas determinadas para los materiales reciclados.

Tabla 3.21. Valores resumidos de las transiciones térmicas de las poliolefinas recicladas. Las transiciones de primer y segundo orden se determinaron a una velocidad de calentamiento de 10 y 20 °C/min respectivamente

Poliolefina	Temperatura de fusión (°C)	Entalpía de fusión (J/g)	Temperatura de transición vítrea (°C)
PEAD	134	172	-
PP	164,7	107,9	-
PEAD/PP 95/5	134,7 / 164,1	188,3	-126

3.4. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE MEZCLADO CON POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS

3.4.1. CAPACIDAD DE LA PLANTA

De acuerdo a datos de EMASEO (2010), Quito genera aproximadamente 1 500 toneladas por día de residuos sólidos, de esta cantidad, el 13,12% equivale a plástico lo que constituye 196,8 toneladas por día de este material. De este monto se recicla cerca del 8% de los cuales el 3% pertenece a poliolefinas (p. 2). A partir de estos datos se obtuvo una producción para la planta a escala piloto de 470 kg/día. Los cálculos se adjuntan en el Anexo X.

3.4.2. UBICACIÓN DE LA PLANTA

La planta estará localizada en la parroquia Calderón del DMQ a la altura del kilómetro 14 y ½ de la Panamericana Norte en las calles Pedro Taciguano S/N y Av. 17 de Marzo.

El terreno tiene un área de 500 m^2, además se encuentra situado en una zona industrial de mediano impacto con fácil acceso a través de la Panamericana Norte y posee todos los servicios básicos.

Este lugar se encuentra próximo a los proveedores de poliolefinas comerciales y recicladas así como a los potenciales compradores de las mezclas elaboradas. Estas empresas se ubican también en la zona industrial del norte de Quito.

3.4.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La planta opera en dos modalidades: producción de mezcla PEAD/PP 95/5 con materiales vírgenes y con materiales reciclados. El procesamiento para ambas es similar.

La operación inicia con la recepción de la materia prima en forma de pellets. Las corrientes 1 y 2 se envían a L-101 y L-102 por separado y se alimentan a X-101 a temperatura ambiente en las proporciones requeridas.

En este proceso las dos corrientes son transportadas por el tornillo interno, fundidas, mezcladas y homogenizadas. Al final se obtiene la corriente 3 que sale del equipo a 220 °C para mezcla comercial y a 210 °C para la reciclada. El molde de X-101 permite obtener cuatro perfiles extruidos tipo “tallarín” de máximo 5 mm de diámetro cada uno.

Entonces la corriente 3 ingresa a V-101 para disminuir su temperatura y evitar la expansión térmica. El enfriamiento se produce por contacto directo con agua refrigerada (rw) a 10 °C suministrada por E-101. Es necesario cambiar el agua de enfriamiento 2 veces por semana.

Al final de esta etapa se obtiene la corriente 4 a 60 °C ya solidificada. El agua utilizada es enviada a E-101 para su recirculación.

Posteriormente la corriente 4 pasa por B-101 que posee dos salidas de aire para retirar el agua adherida a su superficie. Luego del proceso, sale la corriente 5 a 50 °C la misma que es dirigida a M-101 para ser cortada y más tarde derivada a FB-101 para el empaquetamiento y almacenamiento en costales de 25 kg de la corriente 6.

3.4.4. BALANCES DE MASA, ENERGÍA Y ELABORACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DEL PROCESO

3.4.4.1. Balance de masa

Los flujos másicos del PEAD, PP y de la mezcla se indican en la Tabla 3.22. Los cálculos se adjuntan en el Anexo X.

Tabla 3.22. Flujos másicos del PEAD, PP y de la mezcla con materiales comerciales y reciclados

Poliolefina	Flujo másico (kg/h)
PP	2,94
PEAD	55,81
Mezcla PEAD/PP 95/5	58,75

Estos valores corresponden a la producción de una planta a escala piloto.

3.4.4.2. Balance de energía

- Enfriamiento de la mezcla

En la Tabla 3.23 se especifican las temperaturas de entrada y salida al extrusor tanto de las poliolefinas como de las mezclas comerciales y recicladas.

Tabla 3.23. Temperaturas de entrada y salida al extrusor de las poliolefinas y de las mezclas elaboradas

Poliolefinas	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)
PEAD	20	-
PP	20	-
PEAD reciclado	20	-
PP reciclado	20	-
PEAD/PP 95/5	-	220 [a]
PEAD/PP 95/5 reciclada	-	210 [a]

[a] (Naranjo et al., 2002, pp. 53, 57).

La temperatura de salida de la mezcla reciclada es menor debido al riesgo de degradación de estos materiales comparados con los vírgenes. Estos valores corresponden a los máximos para el procesamiento de la mezcla.

En la Tabla 3.24 se muestra los datos utilizados en la determinación de la cantidad de agua requerida para el enfriamiento de la mezcla luego del proceso de extrusión.

La cantidad de agua necesaria para enfriar la mezcla comercial es de 201,72 kg/h. Este valor es mayor que el calculado para la mezcla reciclada debido a la diferencia entre las temperaturas de salida del extrusor especificadas en la Tabla 3.23.

Tabla 3.24. Datos usados en el balance de energía entre el agua refrigerada y la mezcla comercial y reciclada

Parámetro	Mezcla comercial		Mezcla reciclada	
	Agua	Polímero fundido	Agua	Polímero fundido
Cp (J/kg°C)	4 180	2 242,5	4 180	2 242,5
m (kg/h)	201,72	58,75	189,11	58,75
Temperatura de entrada (°C)	10	220	10	210
Temperatura de salida (°C)	35	60	35	60

Por otra parte, de acuerdo a datos del proveedor del Chiller, este equipo opera en un rango máximo de temperaturas entre 10 °C para proveer agua refrigerada y 35 °C para recibirla del proceso. Esta es la razón por la que se fijaron estas temperaturas para el balance. No se consideró variación de la capacidad calórica del agua ni de la mezcla con respecto a la temperatura.

Se observa además en la Tabla 3.24 que el valor de la temperatura de salida para ambas mezclas es de 60 °C. Este dato es 20 °C menor que el punto de reblandecimiento Vicat del PEAD que corresponde a 80 °C según la base de datos internacional de plásticos CAMPUS (2013). Así se asegura que la mezcla estará rígida antes de ingresar al proceso de secado y posteriormente al pelletizado.

- Secado

Tal como se explicó en la sección 2.4.2.1, fue necesaria la determinación experimental de la cantidad de agua adherida al tallarín de la mezcla luego del enfriamiento. Este valor fue de 0,5 ± 0,1% de agua debido a que las poliolefinas no absorben humedad.

Los datos empleados para la determinación del coeficiente de convección del aire se detallan en la Tabla 3.25. Los cálculos se especifican en el Anexo X.

La temperatura de ebullición y el calor latente de vaporización del agua corresponden a las condiciones atmosféricas de Quito. Se asumió que la temperatura de pared del agua es la misma a la que sale la mezcla luego del enfriamiento que corresponde a 60 °C.

Tabla 3.25. Datos usados en el balance de energía para la determinación del coeficiente de convección del aire suministrado por el soplador

Parámetro	Valores
$\dot{m}$ agua (g/s)	0,086
Cp agua (J/g°C)	4,18
Temperatura de ebullición del agua (°C)	90,37
Temperatura de pared (°C)	60
Calor latente de vaporización del agua (J/g)	2 281,27
Área lateral del tallarín de la mezcla (m^2)	0,00628
Temperatura media del aire (°C)	40
Temperatura ambiente (°C)	20
Coeficiente de convección del aire (W/m^2°C)	1 654,53

El coeficiente de convección calculado es de 1 654,53 W/m^2°C. Este valor es alto e indica una transferencia de calor por convección forzada entre el aire y la mezcla.

En la Tabla 3.26 se indican los valores de los números adimensionales Nusselt y Reynolds así como el caudal de aire necesario para secar las mezclas comerciales y recicladas.

De acuerdo al valor del número de Reynolds el aire se encuentra en flujo turbulento. La cantidad de aire requerida para secar el tallarín de la mezcla es de 1 306,98 m^3/h.

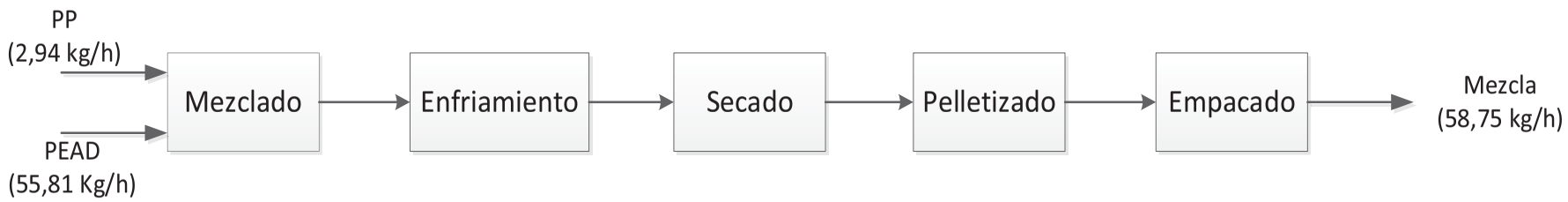
Tabla 3.26. Números adimensionales Nusselt y Reynolds calculados para la determinación del caudal de aire necesario para el secado de las mezclas de poliolefinas

Parámetro	Valor
Nu	122,28
Re	45 537,17
Caudal de aire (m^3/h)	1 306,98

3.4.4.3. Diagramas del proceso

El diagrama de bloques es generalizado para la producción de mezcla con materiales comerciales y reciclados. Este esquema se muestra en la Figura 3.94.

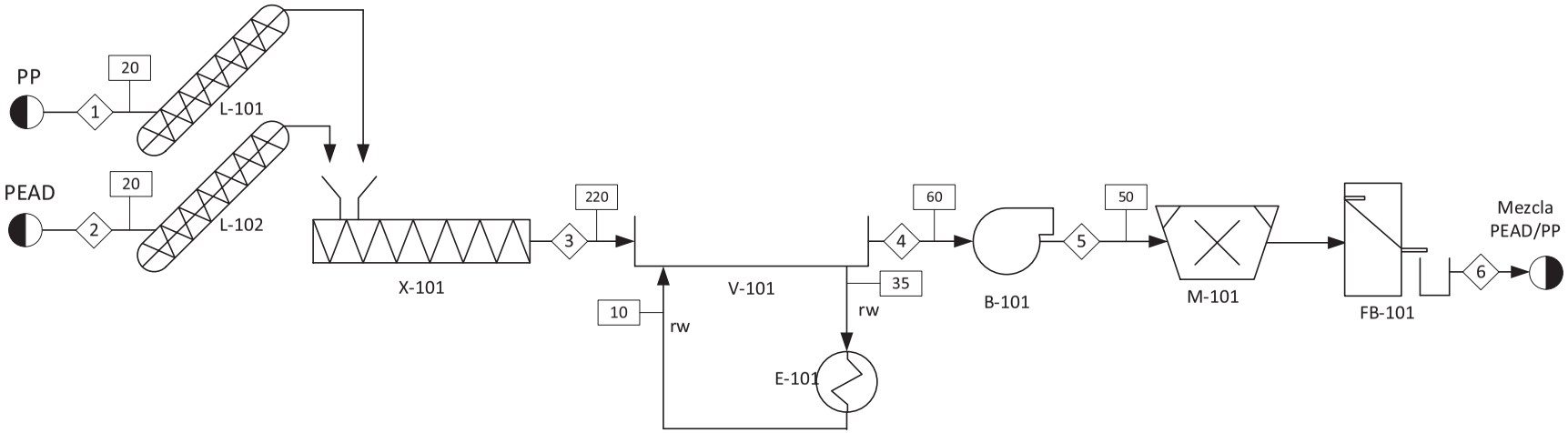
Aunque las etapas para la elaboración de mezclas comercial y reciclada son similares, se efectuaron dos PFD uno para cada proceso, debido la diferencia existente entre las temperaturas de salida del extrusor entre mezclas Éstos se muestran en las Figuras 3.95 y 3.96 respectivamente.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
PROYECTO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE MEZCLADO DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS A ESCALA PILOTO	
TÍTULO: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA CON POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS PEAD/PP 95/5	
REALIZADO POR: MIGUEL PAZMIÑO MÁRQUEZ	**FECHA:** 25/02/2013

Figura 3.94. Diagrama de bloques del proceso para la elaboración de mezclas con poliolefinas comerciales y recicladas

L-101	L-102	X-101	V-101	E-101	B-101	M-101	FB-101
Dosificador de tornillo para PP	Dosificador de tornillo para PEAD	Extrusor monohusillo	Recipiente para agua refrigerada	Enfriador Chiller	Soplador de aire	Pelletizadora	Máquina de llenado

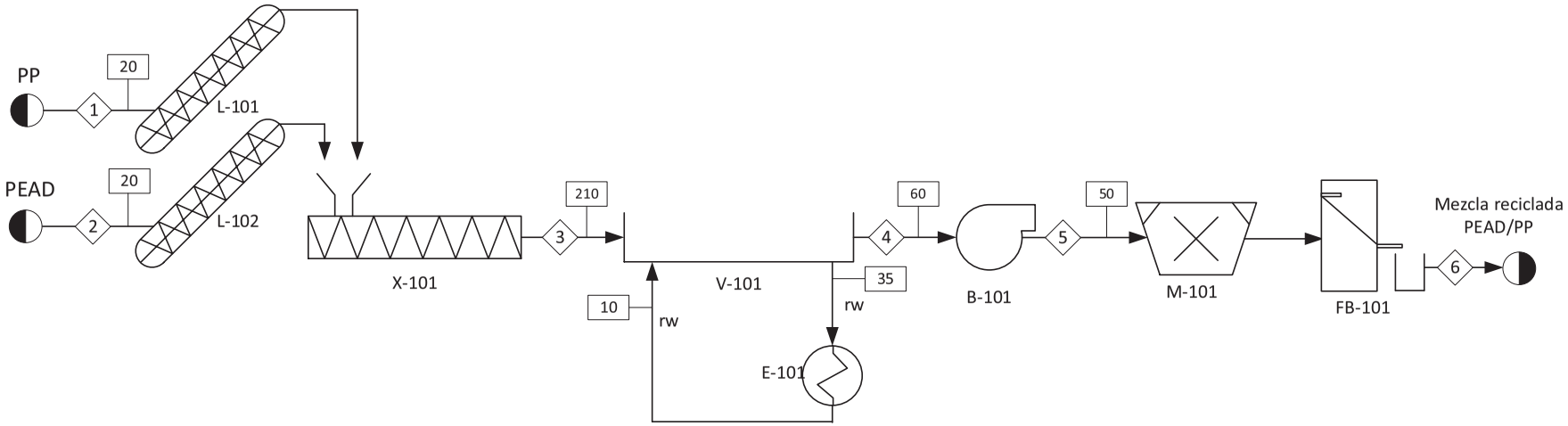


Corriente	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	20	20	220	60	50	25
Flujo másico (kg/h)	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75
PP (kg/h)	2,94	-	-	-	-	-
PEAD (kg/h)	55,81	-	-	-	-	-
Mezcla PEAD/PP 95/5	-	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
PROYECTO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE MEZCLADO DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS A ESCALA PILOTO	
TÍTULO: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA COMERCIAL PEAD/PP 95/5	
REALIZADO POR: MIGUEL PAZMIÑO MÁRQUEZ	FECHA: 25/02/2013

Figura 3.95. Diagrama del flujo del proceso para la elaboración de mezclas con poliolefinas comerciales

L-101	L-102	X-101	V-101	E-101	B-101	M-101	FB-101
Dosificador de tornillo para PP	Dosificador de tornillo para PEAD	Extrusor monohusillo	Recipiente para agua refrigerada	Enfriador Chiller	Soplador de aire	Pelletizadora	Máquina de llenado



Corriente	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	20	20	210	60	50	25
Flujo másico (kg/h)	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75
PP (kg/h)	2,94	-	-	-	-	-
PEAD (kg/h)	55,81	-	-	-	-	-
Mezcla reciclada PEAD/PP 95/5	-	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
PROYECTO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE MEZCLADO DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS A ESCALA PILOTO	
TÍTULO: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA RECICLADA PEAD/PP 95/5	
REALIZADO POR: MIGUEL PAZMIÑO MÁRQUEZ	FECHA: 25/02/2013

Figura 3.96. Diagrama del flujo del proceso para la elaboración de mezclas con poliolefinas recicladas

3.4.5. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

3.4.5.1. Extrusor

En la Tabla 3.27 se muestran las características del extrusor determinadas para cada mezcla. Los cálculos de especifican en el Anexo X.

Tabla 3.27. Parámetros de extrusión para el procesamiento de la mezcla reciclada y comercial

Parámetro	Mezcla reciclada	Mezcla comercial
Diámetro husillo (mm)	60	60
Velocidad del husillo (rpm)	115,5	113,5
Relación L/D	30	30
Relación de compresión Rc	3	3
Potencia mínima (kW)	9,37	9,87

Según Naranjo et al., (2002), estos parámetros se encuentran dentro de los rangos típicos de un extrusor (p. 6). Además se observa que no existe una diferencia marcada entre los parámetros calculados para el procesamiento de las mezclas con materiales vírgenes y con reciclados.

Con base en la Tabla A X.2, se seleccionó 60 mm como el valor óptimo del diámetro del husillo debido a que proporciona un número de revoluciones acorde a los rangos típicos de un extrusor. Al aumentar el valor del diámetro se obtienen menor número de revoluciones pero el extrusor se sobredimensiona de manera innecesaria y el equipo ocuparía demasiado espacio en la planta. Por otro lado, si se disminuye el valor del diámetro se obtienen mayor número de revoluciones las cuales sobrepasan los rangos típicos de un extrusor.

En la Tabla 3.28 se especifican las características geométricas del husillo del extrusor las mismas que fueron estimadas con base en la Figura 3.97.

Tabla 3.28. Características geométricas del husillo por zonas con base en su diámetro

Parámetro	Zona de alimentación	Zona de compresión	Zona de dosificación
D (diámetro mm)	60	60	60
Longitud de la zona (mm)	480	600	720
G (profundidad de la zona mm)	9	-	3
E (diámetro del núcleo mm)	51	-	57
H (paso del husillo mm)	60	60	60
C (ancho del filete mm)	6	6	6
F (juego del husillo mm)	0,6	0,6	0,6
a (ángulo del filete en grados)	17,65	17,65	17,65

(Morales, 2010, p. 247)

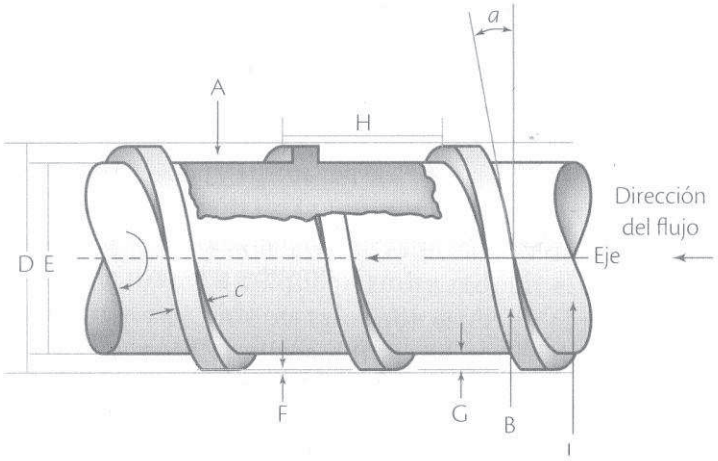


Figura 3.97. Esquema del husillo del extrusor con el que se estimaron sus parámetros geométricos
(Morales, 2010, p. 247)

En general, todas las características geométricas del husillo se basan en su diámetro razón por la cual es de gran importancia su determinación. Asimismo, de acuerdo a Naranjo et al., (2002), estos valores se encuentran dentro de los rangos típicos para el husillo de un extrusor (p. 6).

3.4.5.2. Bandeja de enfriamiento

En la sección 3.4.4.2 se determinó una cantidad de agua para el enfriamiento de la mezcla comercial y reciclada de 201,72 y 189,11 kg/h respectivamente. Se tomó en cuenta el primer valor para la selección de la bandeja de enfriamiento. Este dato equivale a 0,201 m^3/h.

En el mercado existen bandejas de diferentes longitudes, su ancho y profundidad no varían en gran proporción. Se escogió una cuyas dimensiones es detallan en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29. Dimensiones de la bandeja de enfriamiento

Parámetro	Dimensiones (mm)
Altura total	700
Largo	3 000
Ancho	350
Altura de la bandeja	300

En la Figura 3.98 se puede apreciar un modelo de la bandeja seleccionada

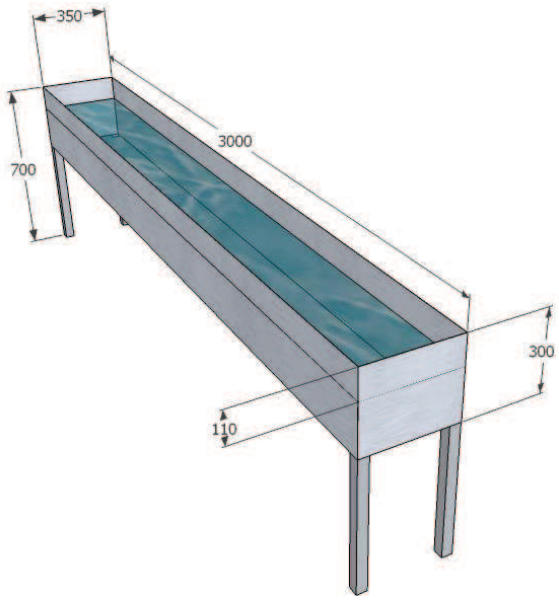


Figura 3.98. Esquema en tres dimensiones de la bandeja de enfriamiento seleccionada para el proceso de mezclado. Las unidades se encuentran en mm

Se observa que la bandeja se ajusta perfectamente a la cantidad máxima de agua requerida para el enfriamiento en una hora. Además se puede observar que existe una altura de 11 cm entre la superficie del agua y el borde de la bandeja para evitar desbordamientos.

3.4.5.3. Soplador

En la figura 3.99 se muestra un esquema del soplador con las dos salidas de aire modificadas.

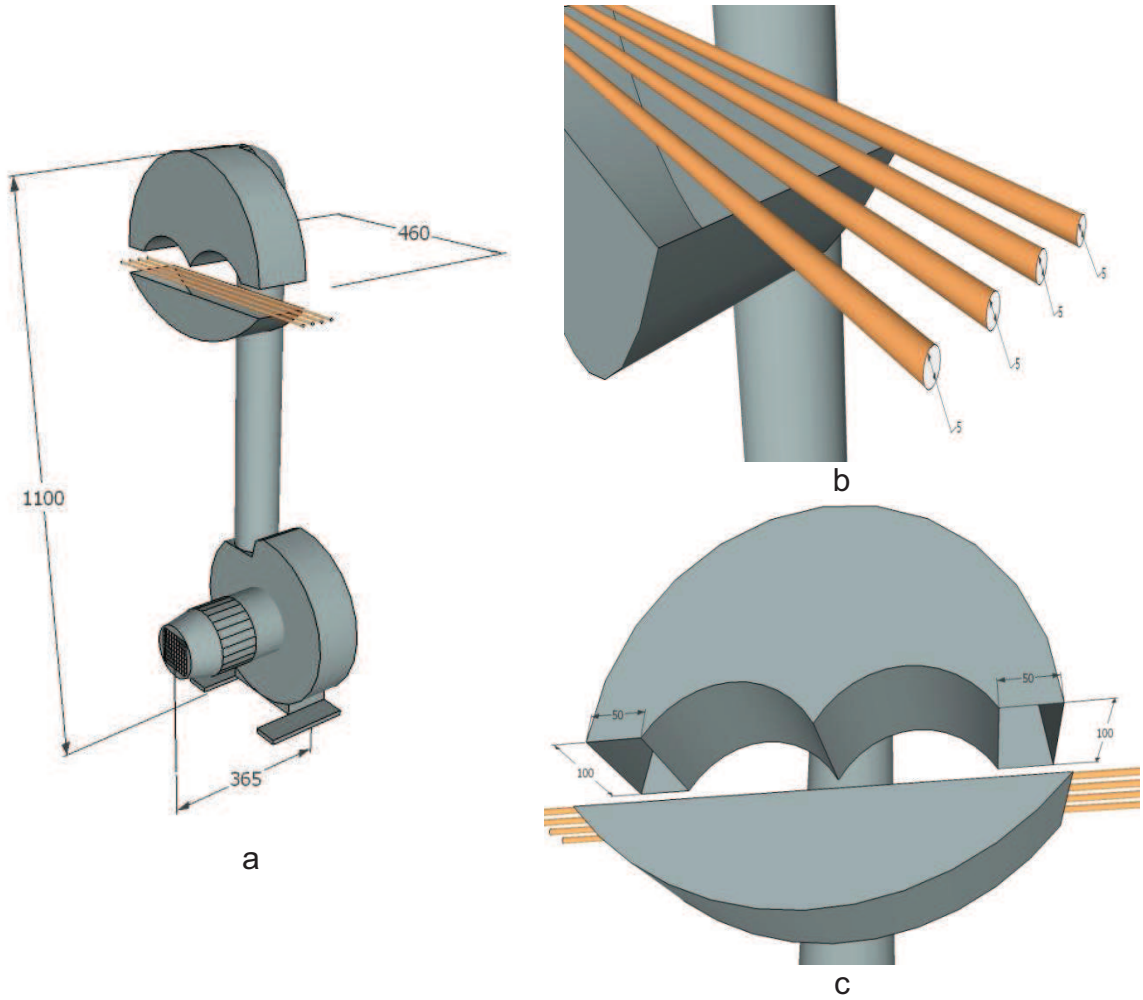


Figura 3.99. a) Esquema en tres dimensiones del soplador seleccionado para el proceso de mezclado. b) Diámetros del extruido de la mezcla. c) Dimensiones de las aberturas de salida de aire. Las unidades se encuentran en mm

Se seleccionó un soplador que entregue como mínimo el caudal de aire calculado en la sección 3.4.4.2 que corresponde a 1 306,98 m^3/h. Este valor equivale a 21 783 l/min. De acuerdo a los datos del proveedor del equipo, éste puede entregar hasta un caudal máximo de 23 000 l/min. En un principio el flujo de aire obtenido era demasiado alto por lo que fue necesario modificar las áreas de salida del aire.

El soplador está diseñado para secar el extruido de la mezcla hasta un máximo de 5 mm de diámetro. Las aberturas tienen dimensiones iguales de 100 x 50 mm^2. Con estas nuevas áreas determinadas se redujo el flujo de aire para secar el extruido.

3.4.5.4. Equipos en general

Los dosificadores se seleccionaron por su capacidad que se ajusta al proceso. La velocidad de rotación de los tornillos puede ser modificada y calibrada para obtener la dosificación requerida tanto para el PEAD como para el PP que corresponde a 55,81 y 2,94 kg/h respectivamente.

El enfriador Chiller permite trabajar con un flujo máximo de agua de 15 l/min. El proceso requiere 3,35 l/min. Este equipo también se adapta a las características requeridas.

La pelletizadora seleccionada puede cortar extruidos hasta 80 kg/h. La máquina de llenado produce hasta 6 costales por hora. Asimismo estos dos equipos se acoplan al proceso de mezclado adecuadamente. Las hojas técnicas se adjuntan en el Anexo XI.

3.4.6. LAY OUT

A continuación se muestra en la Figura 3.100 el diagrama de recorrido del producto para la mezcla comercial y reciclada. Se observan todos los procesos para obtener el producto final a partir de la materia prima.

Por otra parte en la figura 3.101 se aprecia la distribución en planta conjuntamente con el corte frontal para el proceso de mezclado de poliolefinas.

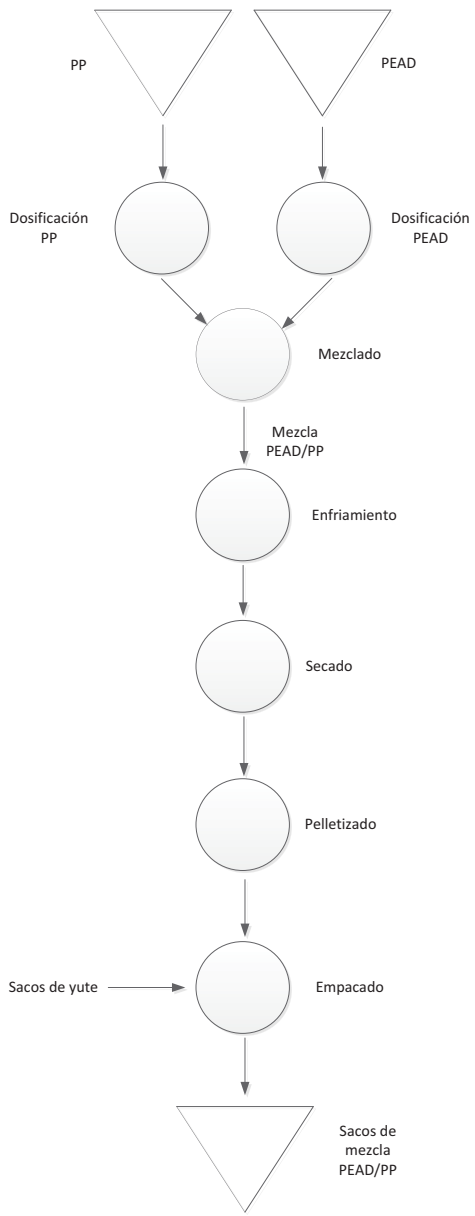


Figura 3.100. Diagrama de recorrido del producto (mezcla PEAD/PP 95/5)

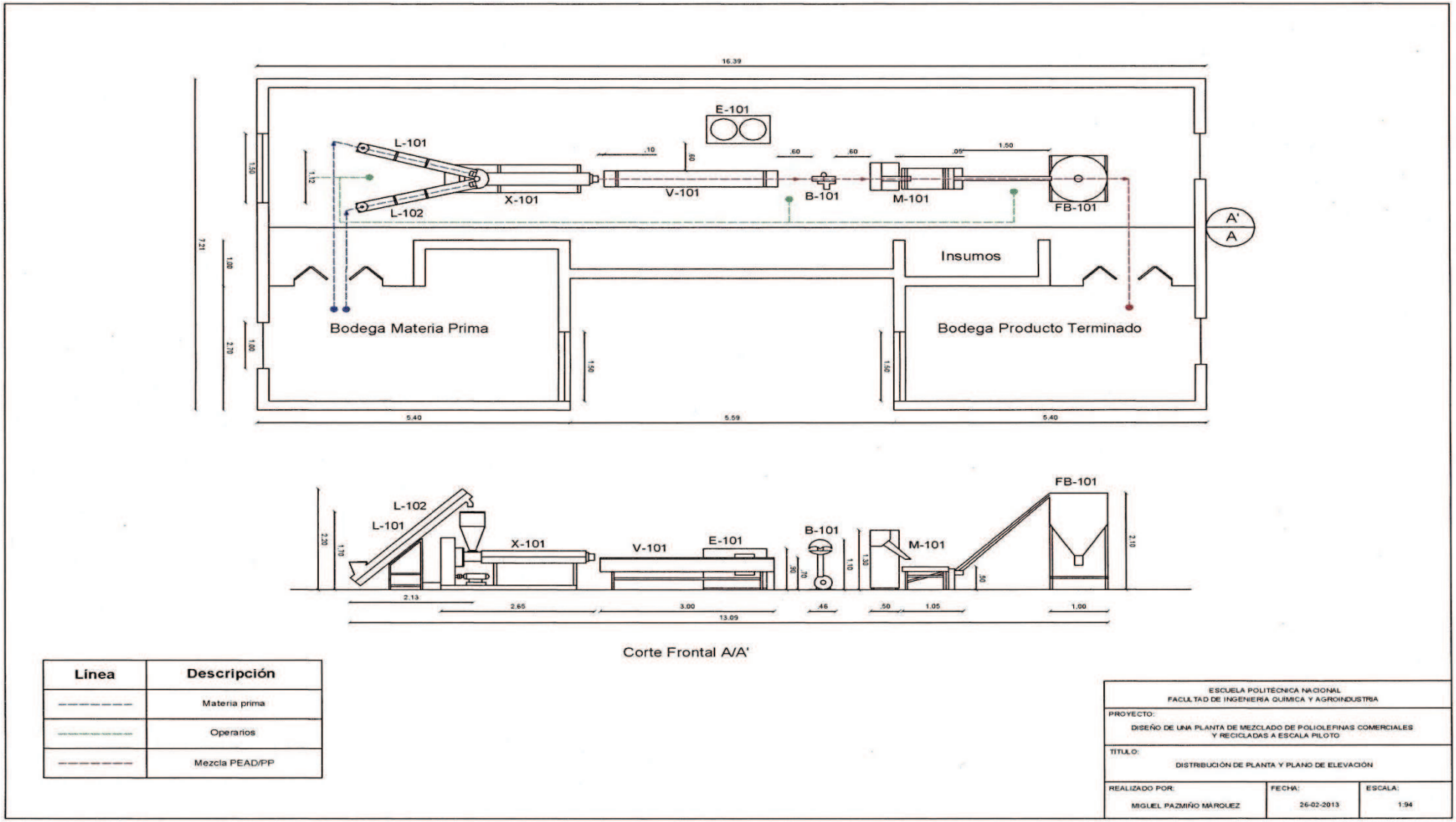


Figura 3.101. Distribución en planta y elevación para la producción de mezclas de poliolefinas comerciales y recicladas PEAD/PP 95/5

3.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DE LA PLANTA DE MEZCLADO DISEÑADA

3.5.1. COSTOS DE LA MATERIA PRIMA

En la Tabla 3.30 se muestran los precios referenciales de la poliolefinas comerciales y recicladas.

Tabla 3.30. Precios referenciales de las poliolefinas comerciales y recicladas

Poliolefina	Precio ($/kg)
PEAD	1,47[a]
PP	1,67[a]
PEAD reciclado	1,00
PP reciclado	1,00

[a](Plastics News, 2013)

Se debe tomar en cuenta que los costos de las poliolefinas, principalmente los de las comerciales, varían de acuerdo al precio del petróleo. Estos datos son referenciales y actualizados a marzo 2013.

3.5.2. COSTOS DE EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES

Las empresas Plastec U.S.A. y HAITIAN Plastics Machinery cotizaron la línea de extrusión para la planta y el sistema de enfriamiento Chiller respectivamente. Esta información se presenta en la Tabla 3.31. Las proformas se adjuntan en el Anexo XII.

Tabla 3.31. Precios de los equipos requeridos para la planta de mezcla de poliolefinas comerciales y recicladas a escala piloto

Equipo		Precio ($)
Línea de extrusión	2 dosificadores	125 800,00
	1 extrusor monohusillo	
	1 bandeja de enfriamiento	
	1 soplador	
	1 pelletizador	
	1 vibrador	
	1 máquina de llenado	
1 Chiller		14 376,20
TOTAL		140 176,20

En la Tabla 3.32 se muestran los costos de los insumos requeridos en la planta.

Tabla 3.32. Costos de consumo de agua y energía eléctrica

Insumo	Costo comercial ($/mes)	Costo reciclada ($/mes)
Agua	3,68	3,58
Energía eléctrica	1 189,18	1 189,18

Se observa que el costo de la electricidad es elevado debido a que la planta consume más de 10 kW por mes y cae en la categoría G5 de acuerdo a la Empresa Eléctrica Quito. El costo de agua por mes es mínimo debido a que se la recircula en el proceso de enfriamiento.

3.5.3. ESTIMACIÓN DEL COSTO DE PRODUCCIÓN POR UNIDAD

El salario de los trabajadores se muestra en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Salario de los trabajadores de la planta

Descripción	Costo ($)
Salario	318,00
Décimo tercer sueldo	318,00
Décimo cuarto sueldo	318,00
IESS (11,15%)	35,46
Total anual	4 877,48
Total mensual	406,46
Total mensual 3 operarios	1 219,37

Se trabajará con tres operarios en planta los mismos que percibirán un salario de $ 318,00 más la afiliación patronal al IESS. Además contarán con todos los beneficios de ley.

En la Tabla 3.34 se presentan los costos por unidad de producción de la planta.

Tabla 3.34. Costo de producción por unidad de mezcla elaborada

Descripción	$/saco de mezcla reciclada	$/saco de mezcla comercial
Materia prima	25,00	55,63
Salario	3,24	3,24
Agua	0,01	0,01
Energía eléctrica	3,16	3,16
Sacos de yute	0,20	0,20
Costo de producción	31,61	62,24

Se aprecia que el costo para producir un saco de 25 kg de mezcla reciclada es de $ 31,61. Esto implica que un kilogramo cuesta $ 1,26. El precio de la mezcla comercial es obviamente mayor por el costo de la materia prima. Esta mezcla cuesta $ 2,49/kg. Los cálculos de toda la sección de análisis económico preliminar se adjuntan en el Anexo XIII.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

1. El material inorgánico determinado en las poliolefinas comerciales no afectó las interacciones de las cadenas en las mezclas pero pudo interferir en la formación de cristales de las poliolefinas al producir nucleaciones heterogéneas.

2. Las curvas de calibración determinadas para el DSC F1 204 Phoenix se ajustaron al rango de trabajo de las poliolefinas en estudio con errores menores a 0,77% para la temperatura y 2,49% para la entalpía de fusión con lo que se asegura que los resultados obtenidos por análisis térmico son estadísticamente confiables.

3. En los termogramas correspondientes al segundo calentamiento a 10 ºC/min de los PEBD y PELBD comerciales, no se observó estabilidad de la línea base antes de la fusión, comportamiento que pudo producirse por el contenido de ramificaciones cortas y largas y por la diferencia en el tamaño de los cristales en la estructura de estos polietilenos.

4. El contenido de los comonómeros 1- hexeno y 1-octeno en el PELBD Dowlex; 1-buteno y 1-octeno en el PELBD Taison provocaron un descenso en sus temperaturas de cristalización y fusión comparadas con los valores obtenidos para el PELBD Braskem que exhibió un solo tipo de comonómero 1-buteno.

5. El criterio de la primera derivada fue un método de gran utilidad para la determinación de las temperaturas de transición vítrea de las poliolefinas que presentaron cambios mínimos en la capacidad calórica. Además este método permitió la determinación de solapamientos de dicha transición y descartar así una posible miscibilidad en el sistema PEBD/PELBD.

6. El sistema PEAD/PP exhibió mejor procesabilidad con menores tiempo y torque en la zona de estabilidad del reograma comparado con el sistema PEBD/PELBD que presentó valores de tiempo y torque más altos.

7. Todas las mezclas elaboradas mostraron adecuada dispersión y distribución macroscópica sin la presencia de zonas con distinta coloración en las probetas que indiquen diferencias en la intensidad de segregación, a excepción de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 que sí presentó dichas regiones sin que esto implique una inadecuada dispersión y distribución macroscópica.

8. El incremento de la concentración del PELBD en el sistema PEBD/PELBD produjo un aumento en el torque registrado en el reograma de la mezcla, provocó un descenso en la temperatura de fusión de sus componentes puros, ocasionó una tercera nucleación en la curva de enfriamiento y originó la disminución en la entalpía de fusión de la mezcla.

9. Tanto el PP como el PEAD, en concentraciones menores a 10%, actuaron como agentes nucleantes en el sistema PEAD/PP por lo que la temperatura de cristalización de la mezcla se incrementó comparada con los valores de sus componentes puros.

10. No se encontró miscibilidad en el sistema PEBD/PELBD para concentraciones menores a 20% de PELBD. Este sistema exhibió una sola T_g en el termograma pero con el criterio de la primera derivada se determinaron los picos correspondientes a las transiciones vítreas del PEBD y PELBD.

11. Se determinó miscibilidad en el sistema PEAD/PP para concentraciones de 5, 90 y 95% de PEAD debido a que estas mezclas exhibieron una sola T_g y se produjeron adecuadas interacción entre sus regiones amorfas.

12. La mezcla PEAD/PP 95/5 presentó mejores características de miscibilidad debido a su mayor variación de la capacidad calórica con respecto a la mezcla con 10% de PP y a la mejor definición de su T_g en el termograma.

13. Se observó que la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 exhibió una sola T_g por lo que se comprobó que la miscibilidad en mezclas con poliolefinas comerciales puede darse también en sistemas con poliolefinas recicladas.

14. La planta se diseñó para producir tanto la mezcla PEAD/PP 95/5 reciclada como la comercial con producción en línea que facilita el procesamiento del perfil extruido tipo “tallarín”. Todos los equipos dimensionados y seleccionados se acoplaron a la producción establecida de la planta.

15. Se requirió mayor cantidad de agua para enfriar la mezcla comercial comparada con la cantidad requerida para la reciclada por la diferencia de temperaturas de salida del extrusor. Debido a que se utilizó un sistema de enfriamiento de agua Chiller el costo de este insumo se redujo a tan solo 3,68 y 3,58 dólares por mes para la mezcla comercial y reciclada respectivamente.

16. Debido a la diferencia en cuanto al costo de la materia prima entre poliolefinas comerciales y recicladas se obtuvo que el costo para producir la mezcla reciclada fue de $1,26/kg mientras que la mezcla con materiales vírgenes tuvo un valor de $2,49/kg.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos por microscopía electrónica de barrido a las probetas de la mezclas para corroborar los datos obtenidos de los termogramas con respecto a sí existe o no separación de fases a nivel molecular.

2. En un futuro, efectuar análisis por DMA a las mezclas para determinar su temperatura de transición vítrea y verificar sí se producen diferencias con los resultados por DSC.

3. Realizar el diseño de la planta para una producción de mezclas con materiales vírgenes y reciclados a escala industrial y efectuar un análisis de costos con indicadores económicos para evaluar la rentabilidad de la planta.

4. Efectuar ensayos por DSC a las mezclas estudiadas con altas velocidades de enfriamiento para evaluar el comportamiento de la temperatura de transición vítrea con el incremento de la fase amorfa en estas mezclas.

5. Realizar un estudio con otros sistemas de poliolefinas como: PEAD/PEBD, PP/PEBD, PP/PELBD o PEAD/PELBD y evaluar la miscibilidad en ellos a través de la temperatura de transición vítrea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abe, S. y Yamaguchi, M. (1999). LLDPE/LDPE Blends. I. Rheological, Thermal, and Mechanical Properties. *Journal of Applied Polymer Science, 74*, 3153-3159.

2. Arnal, M., Sánchez, J., Müller, A. (2001). Miscibility of linear and branched polyethylene blends by thermal fractionation: use of the successive self-nucleation and annealing (SSA) technique. *Polymer, 42,* 6877-6890.

3. Arrighi, V. y Cowie, J. M. G. (2005). Miscibility. En Mark, H. F. (Ed.). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, (pp. 131-148). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

4. ASTM. (2006). *Standard Test Method for Ash Content in Plastics.* (ASTM D 5630-06). Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM

5. ASTM. (2008). *Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastic by Displacement.* (ASTM D 792-08). Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM.

6. ASTM. (2008). *Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusión and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry.* (ASTM D 3418-08). Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM.

7. Avramov, I., Celli, A., Zanotto, E. (2003). Primary Crystal Nucleation and Growth Regime Transition in Isotactic Polypropylene. *Journal of Macromolecular Science, 42*(2), 387-401.

8. Awwad, M., El-Latif, M., Konsowa, H. y Zahran, R. (2009). Development of Isotropic Compatible PEAD/PP Blends for Structural Applications. *Journal of Applied Polymer Science, 115,* 1407–1418. Doi: 10.1002/app.30838.

9. Bailie, C., Bhattacharyya, Shaeiwitz, J., D., Turton, R., Whiting, W. (2012). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. (4ta. Ed.). New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.

10. Banco Central del Ecuador. (2012). Comercio Exterior: Importaciones. Recuperado de http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/Comercio Exterior.jsp, (enero 2013).

11. Bigger, S., Cran, M., Scheirs, J. (2005). Characterizing Blends of Linear Low-Density and Low-Density Polyethylene by DSC. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 81,* 321-327.

12. Brostow, W. y Kalogeras, M. (2008). Glass Transition Temperatures in Binary Polymer Blends. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, *47*, 80-95. Doi: 10.1002/polb.

13. Brown, M. (1998). *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Principles and Practice*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Inc.

14. Cadena, F. y Quiroz, F. (2000). *Manual de Reciclaje de Plásticos*. Quito, Ecuador: Corporación Oikos A&B Editores.

15. CAMPUS. (2013). Base de Datos Internacional de Plásticos: Hoja Técnica PEAD. Recuperado de http://www.campusplastics.com/campus/en/ datasheet/GUR+GHR+8110/Ticona/163/dfa0a653?pos=4 (enero 2013).

16. Choi, D. y White, J. (2005). *Polyolefins: Processing, Structure Development, and Properties*. Munich, Alemania: Hanser.

17. Coates, J. y Nishikida, K. (2003). Infrared and Raman Analysis of Polymers. En Lobo, H. y Bonilla, J. (Ed.). *Handbook of Plastics Analysis,* (Vol. 7). New York, Estados Unidos: Marcel Dekker Inc.

18. DeWitt, D. e Incropera, F. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. (4ta. ed.). México D.F., México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

19. Ehrenstein, G., Riedel, G., Trawiel, P. (2004). *Thermal Analysis of Plastics: Theory and Practice*. Munich, Alemania: Hanser.

20. EMASEO. (2010). *Plan de servicios de aseo.* Recuperado de http://www.emaseo.gob.ec/documentos/planes_aseo/pladeaseotumbaco.pdf (Enero 2013).

21. Gabbott, P. (2008). *Principles and Applications of Thermal Analysis*. Singapore, Singapore: Blackwell Publishing.

22. Gächter, R. y Müller, H. (1993). *Plastics Additives* (4ta. Ed.). Würzburg, Alemania: Hanser.

23. Garton, A. (1992). *Infrared Spectroscopy of Polymer Blends, Composites and Surfaces.* Munich, Alemania: Hanser.

24. Groenewoud, W. (2001). *Characterization of Polymers by Thermal Analysis*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Inc.

25. Haseth, J. y Griffiths, P. (2007). *Fourier Transform Infrared Spectrometry* (2da. Ed.). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

26. Hatakeyama, T. y Quinn, F. X. (1999). *Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science* (2da. Ed.). West Sussex, England: John Wiley & Sons.

27. Hess, M., Horie, K., Stepto R. F., Work, W. J. (2004). Definitions of Terms Related to Polymer Blends, Composites, and Multiphase Polymeric Materials. *Pure and Applied Chemestry, 76*(11). 1985-2007.

28. Koenig, J. L. (1999). *Spectroscopy of Polymers* (2da. Ed.). New York, USA: Elsevier Science Inc.

29. Krevelen, D. W. y Nijenhuis, K. (2009). *Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and*

Prediction from Additive Group Contributions (4ta. Ed.). Amsterdam, Holanda: Elsevier.

30. Kyu, T. y Nwabunma, D. (2008). *Polyolefin Blends*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

31. Mark, E. (1999). *Polymer Data Handbook*. New York, Estados Unidos: Oxford University Press, Inc.

32. Mark, H. (2003). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3ra. Ed.). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

33. Menczel, J. y Prime, R. (2008). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

34. Moore, E. (1996). *Polypropylene Handbook*. Munich, Alemania: Hanser.

35. Morales, J. (2010). *Introducción a la Ciencia y Tecnología de los Plásticos.* México D.F., México: Trillas.

36. Naranjo, A., Noriega, A., Sierra, J., Sanz, J. (2002). *Extrusion Processing Data.* Munich, Alemania: Hanser.

37. Naranjo, A., Noriega, M., Osswald, T., Roldán-Alzate, A., Sierra, J. (2008). *Plastics Testing and Characterization: Industrial Applications*. Munich, Alemania: Hanser.

38. Netzsch. (2010). *Temperature and Sensitivity Calibration Manual*. Alemania: Netzsch.

39. Pascu, M. y Vasile, C. (2005). *Practical Guide to Polyethylene*. Shropshire, Inglaterra: Rapra Technology Limited.

40. Peacock, A. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures, Properties and Applications*. New York, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.

41. Peacock, A. y Calhoun, A. (2006). *Polymer Chemestry: Properties and Applications*. Munich, Alemania: Hanser.

42. Plastics Europe. (2012). *Plásticos-Situación en 2012: Análisis de la producción, la demanda y de la recuperación de plástico en Europa en 2011*. Recuperado de http://www.plasticseurope.es/Document/plasticos---situacion-en-2012.aspx?Page=DOCUMENT&FolID=2 (Enero, 2013).

43. Plastics News. (2013). Resin Pricing: Commodity Thermoplastics. Recuperado de http://www.plasticsnews.com/resin/commodity-thermoplastics/current-pricing, (enero 2013).

44. Prasad, A. (1999). A Quantitative Analysis of Low Density Polyethylene and Linear of Low Density Polyethylene Blends by Differential Scanning Calorimetery and Fourier Transform Infrared Spectroscopy Methods. *Polymer Engineering and Science, 38*(10), 1716-1726.

45. Rauwendaal, C. (1998). *Polymer Mixing: A Self-Study Guide.* Munich, Alemania: Hanser.

46. Robeson, L. M. (2007). *Polymer Blends: A Comprehensive Review*. Munich, Alemania: Hanser.

47. Rosato, D. y Rosato, D. (1989). *Blow Molding Handbook.* Münich, Alemania: Hanser.

48. Scheirs, J. (2000). *Compositional and Failure Analysis of Polymers: A Practical Approach*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.

49. Sichina, W. J. (2000). *Characterization of the Quality of Recycled Polymer Using DSC*. Connecticut, Estados Unidos: Perkin Elmer Inc.

50. Sinnott, R. K. (2001). *Chemical Engineering: Chemical Engineering Design.* (3ra. ed.). Londres, Inglaterra: Butterworth Heinemann (Elsevier Science).

51. Taipe, J. (2008). *Estudio del comportamiento térmico de polietilenos por calorimetría diferencial de barrido DSC.* (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

52. Tripathi, D. (2002). *Practical Guide to Polypropylene*. Shropshire, Inglaterra: Rapra Technology Limited.

53. Utracki, L. A. (2002). *Polymer Blends Handbook*. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers.

54. Zambrano, M. (2008). *Estudio del comportamiento térmico de poliolefinas por calorimetría diferencial de barrido DSC.* (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO I

HOJAS TÉCNICAS DE LAS POLIOLEFINAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO

A continuación se presentan las hojas técnicas de las poliolefinas comerciales:

LUTENE-H ME8000
(PE-HD) LG Chem

Processing/Physical Characteristics	Value	Unit	Test Standard
ASTM Data			
Melt Flow Index	**8**	g/10min	ASTM D 1238
Temperature	**190**	°C	-
Load	**2.16**	kg	-
Density (73°F)	**957**	kg/m³	ASTM D 792

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
ASTM Data			
Tensile Strength at Yield	**28.4**	MPa	ASTM D 638
Elongation at Break	**1000**	%	ASTM D 638
Flexural Modulus	**1030.05**	MPa	ASTM D 790
Shore D Hardness	**65**	-	ASTM D 2240
Izod Impact notched (1/8 in)	**0.0576**	kJ/m	ASTM D 256

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
ASTM Data			
Melting Temperature	**133**	°C	ASTM D 3418
Vicat Temperature	**125**	°C	ASTM D 1525

Characteristics

Processing

Injection Molding, Compression Molding

Regional Availability

North America, Europe, Asia Pacific, South and Central America

Delivery form

White

Source: www.materialdatacenter.com - Last update: 2011-09-02 Page: 1/1

Copyright M-Base Engineering+Software GmbH. M-Base Engineering + Software GmbH assumes no liability for the system to be free of errors. The user takes sole responsibility for the use of this data under the exclusion of every liability from M-Base; this is especially valid for claims of compensation resulting from consequential damages. M-Base explicitly points out that any decision about the application of materials must be double checked with the producer of this material. This includes all contents of this system. Copyright laws are applicable for the content of this system.

Figura A I.1. Hoja técnica del PEAD

DOW LDPE 132G

Low Density Polyethylene Resin
The Dow Chemical Company

IDES | Prospector

Descripción del Producto

La resina de polietileno de baja densidad DOW LDPE™ 132G es fácil de extruir con técnicas de película soplada convencionales a temperaturas de masa fundida comprendidas entre 170 y 230 °C. Esta resina, si se utiliza correctamente, presenta una combinación excelente de propiedades de procesabilidad, rigidez y propiedades físicas. Este producto no contiene aditivos deslizante ni antibloqueo

Nota: Cumple con:
U.S. FDA 21 CFR 177.1520(c)2.2
EU, No 10/2011
Consulte las regulaciones para detalles completos.

Aplicaciones:
- Película industrial de uso pesado
- Película termocontraíble

General

Estado del Material	• Comercial: Activo	
Disponibilidad	• Latinoamérica	
Clasificaciones de Agencia	• EU No 10/2011	• FDA 21 CFR 177.1520(c) 2.2
Formas	• Pellets	
Método de Procesamiento	• Extrusión de Película	• Película soplada

Prop. físicas	Valor Típico Unidad	Comprobar método
Gravedad específica	0.921 g/cm³	ASTM D792
Velocidad de Fundido (190°C/2,16 kg)	0.25 g/10 min	ASTM D1238
Películas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Espesor del film	51 µm	
Dureza del film		ASTM D882
Dirección de la máquina: 51 µm	216 J/cm³	
Dirección transversal: 51 µm	211 J/cm³	
Resistencia a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Límite de elasticidad, 51 µm	12.1 MPa	
Dirección transversal: Límite de elasticidad, 51 µm	12.1 MPa	
Dirección de la máquina: Rotura, 51 µm	31.8 MPa	
Dirección transversal: Rotura, 51 µm	28.9 MPa	
Alargamiento a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura, 51 µm	470 %	
Dirección transversal: Rotura, 51 µm	660 %	
Impacto por caída de dardo (51 µm)	190 g	ASTM D1709A
Resistencia al desgarramiento Elmendorf		ASTM D1922
Dirección de la máquina: 51 µm	300 g	
Dirección transversal: 51 µm	180 g	

Extrusión	Valor Típico Unidad
Temperatura de fusión	216 °C

Notas sobre la extrusión

Condiciones de fabricación para el film soplado:
- Tamaño de tornillo: 2,5 pulg (63,5 mm); 30:1 L/D
- Tipo de tornillo: filete simple doble mezcla
- Hueco de troquel: 40 mil (1,02 mm)
- Temperatura de fundido: 420 °F (215 °C)
- Salida: 8 lb/h/pulg de la circunferencia
- Diámetro de troquel: 6 pulg
- Relación de soplado: 2,5:1

Notas

[1] Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

Copyright © 2012 - IDES - The Plastics Web ® | 800-788-4668 or 307-742-9227 | www.ides.com.

La información presentada en este boletín técnico ha sido adquirida por IDES del productor del material. IDES realiza considerables esfuerzos para garantizar la exactitud de estos datos. No obstante, IDES no asume responsabilidad alguna por los valores de los datos y recomienda encarecidamente que los datos del material se confirmen con el proveedor antes de la selección final.

Historial de revisión
Documento creado: Wednesday, January 11, 2012
Añadido a Prospector: November, 2007
Última actualización: 7/28/2011

Figura A I.2. Hoja técnica del PEBD Dow

HANWHA LDPE 5302

Polietileno de baja densidad
Hanwha Chemical

IDES | Prospector

Descripción del Producto
HANWHA LDPE 5302 is manufactured by DOW tubular high pressure process and designed for variety of film application such as heavy duty and greenhouse film. LDPE 5302 has well balanced mechanical property and processability.

General			
Estado del Material	• Comercial: Activo		
Disponibilidad	• Asia-Pacifico	• Europa	
Aditivo	• Antibloqueo	• Antioxidante	
Características	• Antibloqueante	• Antioxidante	• Buena procesabilidad
Usos	• Film		
Clasificaciones de Agencia	• FDA 21 CFR 177.1520(c) 2.1		
Formas	• Pellets		
Método de Procesamiento	• Extrusión de Película		

Prop. físicas	Valor Típico Unidad	Comprobar método
Densidad	0.922 g/cm³	ASTM D1505
Velocidad de Fundido (190°C/2,16 kg)	0.30 g/10 min	ASTM D1238
Prop. mecánicas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Resistencia a la tensión (Rotura)	17.2 MPa	ASTM D638
Alargamiento a la tensión (Rotura)	750 %	ASTM D638
Películas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Espesor del film	80 µm	
Resistencia a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura, 80 µm	27.0 MPa	
Dirección transversal: Rotura, 80 µm	23.0 MPa	
Alargamiento a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura, 80 µm	350 %	
Dirección transversal: Rotura, 80 µm	600 %	
Impacto por caída de dardo (80 µm)	240 g	ASTM D1709
Prop. térmicas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Temperatura de fragilización	< -76.0 °C	ASTM D746
Temperatura de Ablandamiento Vicat	94.0 °C	ASTM D1525
Punto de Fusión	110 °C	
Prop. ópticas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Neblina (80.0 µm)	17 %	ASTM D1003
Información adicional	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Tensile Tear Strength		ASTM D1004
MD: 80.0 µm	107.9 kN/m	
TD: 80.0 µm	88.3 kN/m	

Extrusión	Valor Típico Unidad
Temperatura de fusión	150 a 190 °C

Notas sobre la extrusión
Blow-up Ratio: 2 to 3 Optimum Gage Range: 0.05 to 0.2 mm

Notas

[1] Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

Copyright © 2012 - IDES - The Plastics Web ® | 800-788-4668 or 307-742-9227 | www.ides.com.

La información presentada en este boletín técnico ha sido adquirida por IDES del productor del material. IDES realiza considerables esfuerzos para garantizar la exactitud de estos datos. No obstante, IDES no asume responsabilidad alguna por los valores de los datos y recomienda encarecidamente que los datos del material se confirmen con el proveedor antes de la selección final.

Historial de revisión
Documento creado: Wednesday, January 11, 2012
Añadido a Prospector: January, 2006
Última actualización: 7/9/2010

Figura A I.3. Hoja técnica del PEBD Hanwha

Lotrene® FB3003

Polietileno de baja densidad

QAPCO

IDES | Prospector

General			
Estado del Material	• Comercial: Activo		
Disponibilidad	• Europa		
Características	• ESCR (resist. al agrietamiento por esfuerzo) alta	• Sin aditivos	
Usos	• Aplicaciones agrícolas • Aplicaciones de construcción • Aplicaciones industriales	• Botellas • Camisas de cables • Envoltura retráctil	• Film • Tuberías
Clasificaciones de Agencia	• EC 1907/2006 (REACH)		
Formas	• Pellets		
Método de Procesamiento	• Extrusión de Película	• Moldeo por soplado	

Prop. físicas	Valor Típico Unidad	Comprobar método
Densidad	0.920 g/cm³	ASTM D1505
Velocidad de Fundido (190°C/2,16 kg)	0.30 g/10 min	ASTM D1238
Prop. mecánicas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Coeficiente de fricción	0.50	ASTM D1894
Películas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Espesor del film	50 µm	
Espesor Disponible para Venta	50 to 25µm	
Resistencia a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Límite de elasticidad, 50 µm	16.0 MPa	
Dirección transversal: Límite de elasticidad, 50 µm	11.0 MPa	
Dirección de la máquina: Rotura, 50 µm	25.0 MPa	
Dirección transversal: Rotura, 50 µm	25.0 MPa	
Alargamiento a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura, 50 µm	550 %	
Dirección transversal: Rotura, 50 µm	600 %	
Impacto por caída de dardo [2] (50 µm)	220 g	ASTM D1709B
Prop. térmicas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Temperatura de Ablandamiento Vicat	95.0 °C	ASTM D1525
Temperatura máxima de cristalización (calorimetría de barrido diferencial, DSC)		ASTM E794
--	109 °C	
Prop. ópticas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Brillo (45°, 50.0 µm)	40	ASTM D2457
Claridad (50.0 µm)	25.0	ASTM D1746
Neblina (50.0 µm)	13 %	ASTM D1003

Extrusión	Valor Típico Unidad
Temperatura de fusión	180 a 210 °C

Notas

[1] Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

[2] F50

Copyright © 2012 - IDES - The Plastics Web ® | 800-788-4668 or 307-742-9227 | www.ides.com.

La información presentada en este boletín técnico ha sido adquirida por IDES del productor del material. IDES realiza considerables esfuerzos para garantizar la exactitud de estos datos. No obstante, IDES no asume responsabilidad alguna por los valores de los datos y recomienda encarecidamente que los datos del material se confirmen con el proveedor antes de la selección final.

Historial de revisión
Documento creado: Wednesday, January 11, 2012
Añadido a Prospector: July, 2001
Última actualización: 7/14/2011

Figura A I.4. Hoja técnica del PEBD Lotrene

Braskem PE LL-118

Polietileno lineal de baja densidad
Braskem

IDES | Prospector

Descripción del Producto

Description:
LL118 is a Linear Low Density Polyethylene, copolymer of butene-1, produced by Spherilene process. Developed for blown film extrusion in blends with polyethylenes. Films obtained with this product show a good processing performance balanced with good optical and mechanical properties as well as sealability. Very low gel amount. It contains antioxidant additives.

Applications:
Stretch films; liners; LDPE and HDPE blends and packages for general use. Others applications: blends for irrigation pipes.

General

Estado del Material	• Comercial: Activo		
Disponibilidad	• Asia-Pacífico • Europa	• Latinoamérica • Norteamérica	• Sudamérica
Aditivo	• Antioxidante		
Características	• Buena procesabilidad • Copolímero	• Densidad baja • Gel de solidificación lenta	• Propiedades ópticas • Uso general
Usos	• Film • Mezclado	• Revestimientos • Uso general	
Clasificaciones de Agencia	• FDA 21 CFR 177.1520		
Formas	• Pellets		
Método de Procesamiento	• Extrusión de Moldeo por Soplado	• Extrusión de Película	

Prop. físicas	Valor Típico Unidad	Comprobar método
Densidad	0.916 g/cm³	ASTM D1505
Velocidad de Fundido (190°C/2.16 kg)	1.0 g/10 min	ASTM D1238
Películas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Espesor del film	38 µm	
Resistencia a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura	46.0 MPa	
Dirección transversal: Rotura	38.0 MPa	
Alargamiento a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura	1100 %	
Dirección transversal: Rotura	1400 %	
Modulo de Flexión		ASTM D790
1% Secant, Dirección de la máquina	183 MPa	
1% Secant, Dirección transversal	196 MPa	
Impacto por caída de dardo	120 g	ASTM D1709
Resistencia al desgarramiento Elmendorf - Dirección transversal	380 g	ASTM D1922
Prop. ópticas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Brillo (60°)	48	ASTM D2457
Neblina	37 %	ASTM D1003

Extrusión	Valor Típico Unidad
Temperatura de fusión	170 a 210 °C

Notas sobre la extrusión

Blown Film
Blow up ratio: 2 to 3:1

Notas

[1] Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

Copyright © 2012 - IDES - The Plastics Web ® | 800-788-4668 or 307-742-9227 | www.ides.com.

La información presentada en este boletín técnico ha sido adquirida por IDES del productor del material. IDES realiza considerables esfuerzos para garantizar la exactitud de estos datos. No obstante, IDES no asume responsabilidad alguna por los valores de los datos y recomienda encarecidamente que los datos del material se confirmen con el proveedor antes de la selección final.

Historial de revisión
Documento creado: Wednesday, January 11, 2012
Añadido a Prospector: August, 2004
Última actualización: 12/21/2011

Figura A I.5. Hoja técnica del PELBD Braskem

DOWLEX™ 2645G
Polyethylene Resin
The Dow Chemical Company

IDES | Prospector

Descripción del Producto

La resina de polietileno DOWLEX™ está diseñada para la fabricación de una gran variedad de aplicaciones de película. Las películas fabricadas con esta resina presentan una combinación de buenas propiedades de resistencia y resistencia al rasgado

Cumple con:
- U.S. FDA FCN 741
- HPFB (Canada), No Objection
- EU, No 10/2011

Consulte las regulaciones para detalles completos.

General

Estado del Material	• Comercial: Activo		
Disponibilidad	• Asia-Pacífico	• Norteamérica	
Clasificaciones de Agencia	• EU No 10/2011	• FDA FCN 741	• HPFB (Canadá) No objeción
Formas	• Pellets		
Método de Procesamiento	• Película soplada		

Prop. físicas	Valor Típico Unidad	Comprobar método
Gravedad específica	0.919 g/cm³	ASTM D792
Velocidad de Fundido (190°C/2,16 kg)	0.90 g/10 min	ASTM D1238
Películas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Espesor del film	51 µm	
Resistencia al Punzonado (51 µm)	16.6 J/cm³	Internal Method
Módulo de secante		ASTM D882
Modulo Secante 2%, Dirección de la máquina: 51 µm	168 MPa	
Modulo Secante 2%, Dirección transversal: 51 µm	238 MPa	
Resistencia a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Límite de elasticidad, 51 µm	14.2 MPa	
Dirección transversal: Límite de elasticidad, 51 µm	14.6 MPa	
Dirección de la máquina: Rotura, 51 µm	48.8 MPa	
Dirección transversal: Rotura, 51 µm	39.2 MPa	
Alargamiento a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura, 51 µm	620 %	
Dirección transversal: Rotura, 51 µm	740 %	
Impacto por caída de dardo (51 µm)	300 g	ASTM D1709A
Resistencia al desgarramiento Elmendorf		ASTM D1922
Dirección de la máquina: 51 µm	720 g	
Dirección transversal: 51 µm	1000 g	
Prop. térmicas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Temperatura de Ablandamiento Vicat	107 °C	ASTM D1525
Temperatura de fusión (calorimetría de barrido diferencial, DSC)		Internal Method
--	120 °C	
Prop. ópticas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Brillo (45°, 50.8 µm)	63	ASTM D2457
Neblina (50.8 µm)	12 %	ASTM D1003

Notas sobre la extrusión

Condiciones de fabricación para el film soplado:
- Tamaño de tornillo: 2,5 pulg (63,5 mm) 30:1L/D
- Tipo de tornillo: DSBII
- Hueco de troquel: 70 mil (1,8 mm)
- Salida: 10 lb/h/pulg de la circunferencia
- Diámetro de troquel: 6 pulg
- Relación de soplado: 2,5 : 1

Notas

[1] Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

Copyright © 2012 - IDES - The Plastics Web ® | 800-788-4668 or 307-742-9227 | www.ides.com.

La información presentada en este boletín técnico ha sido adquirida por IDES del productor del material. IDES realiza considerables esfuerzos para garantizar la exactitud de estos datos. No obstante, IDES no asume responsabilidad alguna por los valores de los datos y recomienda encarecidamente que los datos del material se confirmen con el proveedor antes de la selección final.

Historial de revisión
Documento creado: Wednesday, January 11, 2012
Añadido a Prospector: November, 2005
Última actualización: 7/25/2011

Figura A I.6. Hoja técnica del PELBD Dowlex

TAISOX 3210

Polietileno lineal de baja densidad
Formosa Chemicals & Fibre Corporation

IDES | Prospector

General			
Estado del Material	• Comercial: Activo		
Disponibilidad	• Asia-Pacífico		
Aditivo	• Antioxidante		
Características	• Antioxidante • Buen estirado	• Buen termosellado • Densidad baja	• Resistencia alta a la tensión • Resistente a la perforación
Usos	• Aplicaciones agrícolas • Bolsas	• Envoltura conformada por estiramiento • Film	• Revestimientos
Formas	• Pellets		
Método de Procesamiento	• Película soplada		

Prop. físicas	Valor Típico Unidad	Comprobar método
Densidad	0.920 g/cm³	ASTM D1505
Velocidad de Fundido (190°C/2,16 kg)	1.0 g/10 min	ASTM D1238
Películas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Espesor del film	38 µm	
Módulo de secante		ASTM D882
Modulo Secante 1%, Dirección de la máquina: 38 µm, Film Soplado	142 MPa	
Modulo Secante 1%, Dirección transversal: 38 µm, Film Soplado	157 MPa	
Resistencia a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Límite de elasticidad, 38 µm, Film Soplado	9.81 MPa	
Dirección transversal: Límite de elasticidad, 38 µm, Film Soplado	10.8 MPa	
Dirección de la máquina: Rotura, 38 µm, Film Soplado	40.2 MPa	
Dirección transversal: Rotura, 38 µm, Film Soplado	31.4 MPa	
Alargamiento a la tensión		ASTM D882
Dirección de la máquina: Rotura, 38 µm, Film Soplado	620 %	
Dirección transversal: Rotura, 38 µm, Film Soplado	840 %	
Impacto por caída de dardo		ASTM D1709
38 µm, Film Soplado	150 g	
Resistencia al desgarramiento Elmendorf		ASTM D1922
Dirección de la máquina: 38 µm, Film Soplado	220 g	
Dirección transversal: 38 µm, Film Soplado	560 g	
Prop. térmicas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Temperatura de fragilización	-70.0 °C	ASTM D746
Temperatura de Ablandamiento Vicat	93.0 °C	ASTM D1525
Punto de Fusión	122 °C	
Prop. ópticas	**Valor Típico Unidad**	**Comprobar método**
Brillo (45°, 38.0 µm, Film Soplado)	43	ASTM D2457
Claridad	67.0	ASTM D1746
Neblina (38.0 µm, Film Soplado)	13 %	ASTM D1003
Información adicional		
Blow Up Ratio: 2		

Notas

[1] Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

Copyright © 2012 - IDES - The Plastics Web ® | 800-788-4668 or 307-742-9227 | www.ides.com.

La información presentada en este boletín técnico ha sido adquirida por IDES del productor del material. IDES realiza considerables esfuerzos para garantizar la exactitud de estos datos. No obstante, IDES no asume responsabilidad alguna por los valores de los datos y recomienda encarecidamente que los datos del material se confirmen con el proveedor antes de la selección final.

Historial de revisión
Documento creado: Wednesday, January 11, 2012
Añadido a Prospector: May, 2005
Última actualización: 5/13/2009

Figura A I.7. Hoja técnica del PELBD Taisox

SK energy

Data Sheet
Date Prepared:

HOMO PP H360F

YUPLENE H360F is a propylene homopolymer designed for injection molding applications. YUPLENE H360F has high stiffness, good dimensional stability and has been listed by Underwriters Laboratories (UL). YUPLENE H360F is suitable for household articles, food containers and seedbeds.
YUPLENE H360F complies with FDA regulation 21 CFR177.1520.

Application / Use Case

Injection Molding / commodity, home appliances

Specification

	Specification	Unit	Test Method
Melt Index	12.0	g/10min	ASTM D1238

Physical Properties

	Value	Unit	Test Method
Softening Point(Vicat)	154	°C	ASTM D1525
Tensile Strength at Yield	380	kg/cm²	ASTM D638
Elongation at Break	>500	%	ASTM D638
IZOD Impact Strength(Notched, 23°C)	4.0	kg·cm/cm	ASTM D256
Flexural Modulus	16000	kg/cm²	ASTM D790
Hardness(Rockwell)	95	R Scale	ASTM D785
Heat Distortion Temperature	95	°C	ASTM D648
Spiral Flow	800	mm	SK Method

These are typical properties only, and are not to be construed as specific limits.

Head Office 99 Seorin-dong, Jongno-gu, Seoul 110-110, Korea
Tel. 82-2-2121-5114 Fax. 82-2-2121-7001
SK Institute of Technology 140-1 Woncheon-dong, Yuseong-gu, Taejeon, Korea
Tel. 82-42-866-7624 Fax. 82-42-866-7603
Online SK energy co., ltd. : www.SKenergy.com
Chemical Business : www.skchem.com

ISO 9001 Certified

Figura A I.8. Hoja técnica del PP

ANEXO II

CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS

Los cálculos se realizaron con la fórmula establecida en la norma ASTM 5630-06 y que se cita a continuación:

$$Contenido\ (ppm) = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)} \times 10^6 \qquad \text{[A II.1]}$$

Donde:

W_1 = masa del crisol (g)
W_2 = masa del crisol más masa de la muestra (g)
W_3 = masa del crisol más masa de las cenizas (g)

- Ejemplo de cálculo para el PEAD

$$Contenido\ \ ppm\ = \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_M - W_1} \times 10^6 = \frac{W_2 - W_1}{W_M} \times 10^6 \qquad \text{[A II.2]}$$

Donde:

W_M = masa de la muestra (g)

$$Contenido\ \ ppm\ = \frac{34{,}3963 - 34{,}3938}{10{,}0795} \times 10^6 = 248 \qquad \text{[A II.3]}$$

Tabla A II.1. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEAD

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas (g)	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	34,3938	10,0795	34,3963	248	238	11
2	35,1442	10,03	35,1466	239		
3	35,1447	8,3709	35,1466	227		

Tabla A II.2. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEBD Dow

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	35,6338	10,0297	35,6361	229	238	9
2	34,9293	10,0665	34,9317	238		
3	36,4117	10,0972	36,4142	248		

Tabla A II.3. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEBD Hanwha

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	35,1734	10,0124	35,1765	310	318	10
2	34,4076	10,1837	34,4108	314		
3	35,6789	10,0398	35,6822	329		

Tabla A II.4. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEBD Lotrene

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	35,7765	10,2436	35,7779	137	150	16
2	39,8041	10,2465	39,8056	146		
3	34,3547	10,1762	34,3564	167		

Tabla A II.5. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PELBD Braskem

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	35,145	10,1971	35,1473	226	210	14
2	34,3946	10,1588	34,3967	207		
3	35,5625	10,068	35,5645	199		

Tabla A II.6. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PELBD Dowlex

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desv. Estándar
1	34,4287	10,4056	34,4312	240	241	11
2	35,5764	10,2856	35,579	253		
3	30,3509	10,4133	30,3533	230		

Tabla A II.7. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PELBD Taisox

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	36,6472	10,0237	36,6493	210	219	10
2	34,3856	10,0169	34,3879	230		
3	30,3496	10,1216	30,3518	217		

Tabla A II.8. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PP

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas (g)	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	33,7137	10,2189	33,7194	558	558	19
2	32,0357	10,0377	32,0415	578		
3	35,5613	10,1942	35,5668	540		

Tabla A II.9. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PEAD reciclado

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas (g)	Cenizas (%)	Promedio (%)	Desviación Estándar
1	35,7771	10,2418	35,9405	1,595	1,596	0,001
2	39,8045	10,0517	39,9649	1,596		
3	30,4518	10,0538	30,6124	1,597		

Tabla A II.10. Valores para la obtención del porcentaje de inorgánicos del PP reciclado

Mediciones	W Crisol (g)	W muestra (g)	W crisol + cenizas	Cenizas (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación Estándar
1	35,6324	10,1324	35,6431	1056	1067	15
2	34,9282	10,084	34,9389	1061		
3	36,7274	10,1401	36,7384	1085		

ANEXO III

CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS

$$\delta = \frac{A}{P}\delta_0 = \frac{A}{A-B}\delta_0 \qquad \text{[A III.1]}$$

Donde:

δ = densidad del material (g/cm^3)
A = masa del polímero en el aire (g)
B = masa del polímero sumergido en el etanol (g)
P = empuje del polímero en el etanol (g)
δ_o = densidad del etanol a la temperatura de trabajo (g/cm^3)

- Ejemplo de cálculo para el PEAD

$$\delta = \frac{0{,}1951}{0{,}1644} \times 0{,}7902 = 0{,}9378\ \frac{g}{cm^3} \qquad \text{[A III.2]}$$

Tabla A III.1. Valores para la determinación de la densidad del PEAD a 19 °C y con densidad del etanol de 0,7902 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,1951	0,0307	0,1644	0,9378	0,9406	0,0041
2	0,3204	0,0507	0,2697	0,9387		
3	0,5280	0,0866	0,4414	0,9452		

Tabla A III.2. Valores para la determinación de la densidad del PEBD Dow a 18,5 °C y con densidad del etanol de 0,79062 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2916	0,041	0,2506	0,9200	0,9206	0,0005
2	0,2838	0,0401	0,2437	0,9207		
3	0,2719	0,0385	0,2334	0,9210		

Tabla A III.3. Valores para la determinación de la densidad del PEBD Hanwha 18 °C y con densidad del etanol de 0,79105 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2133	0,03	0,1833	0,9205	0,9208	0,0004
2	0,2158	0,0305	0,1853	0,9213		
3	0,2024	0,0285	0,1739	0,9207		

Tabla A III.4. Valores para la determinación de la densidad del PEBD Lotrene 18,5 °C y con densidad del etanol de 0,79062 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2964	0,0416	0,2548	0,9197	0,9199	0,0004
2	0,2539	0,0356	0,2183	0,9196		
3	0,2753	0,0388	0,2365	0,9203		

Tabla A III.5. Valores para la determinación de la densidad del PELBD Braskem a 18 °C y con densidad del etanol de 0,79105 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2327	0,0319	0,2008	0,9167	0,9163	0,0005
2	0,2294	0,0314	0,198	0,9165		
3	0,2158	0,0294	0,1864	0,9158		

Tabla A III.6. Valores para la determinación de la densidad del PELBD Dowlex a 18 °C y con densidad del etanol de 0,79105 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2562	0,0358	0,2204	0,9195	0,9193	0,0004
2	0,2506	0,035	0,2156	0,9195		
3	0,2566	0,0357	0,2209	0,9189		

Tabla A III.7. Valores para la determinación de la densidad del PELBD Taisox a 19 °C y con densidad del etanol de 0,7902 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,1927	0,027	0,1657	0,9190	0,9192	0,0003
2	0,1906	0,0268	0,1638	0,9195		
3	0,1953	0,0274	0,1679	0,9192		

Tabla A III.8. Valores para la determinación de la densidad del PP a 19 °C y con densidad del etanol de 0,7902 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2536	0,0286	0,2250	0,8906	0,8894	0,0029
2	0,2931	0,0333	0,2598	0,8915		
3	0,2690	0,0291	0,2399	0,8861		

Tabla A III.9. Valores para la determinación de la densidad del PP reciclado a 21 °C y con densidad del etanol de 0,78849 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,2184	0,0282	0,1902	0,9054	0,9073	0,0017
2	0,1795	0,0237	0,1558	0,9084		
3	0,2247	0,0296	0,1951	0,9081		

Tabla A III.10. Valores para la determinación de la densidad del PEAD reciclado a 21 °C y con densidad del etanol de 0,78849 g/cm^3

Medición	A (g)	B (g)	P (g)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	0,162	0,0278	0,1342	0,9518	0,9506	0,0011
2	0,1148	0,0195	0,0953	0,9498		
3	0,1323	0,0225	0,1098	0,9501		

ANEXO IV

VALORES DE DENSIDAD DEL ETANOL CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.

En la Tabla A IV.1 se presentan los valores de la densidad del etanol. Los rectángulos en color rojo indican los datos usados para la corrección de la densidad de las poliolefinas.

Tabla A IV.1. Valores de las densidad del etanol con respecto a la temperatura en g/cm^3

T/°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10.	0.79784	0.79775	0.79767	0.79758	0.79750	0.79741	0.79733	0.79725	0.79716	0.79708
11.	0.79699	0.79691	0.79682	0.79674	0.79665	0.79657	0.79648	0.79640	0.79631	0.79623
12.	0.79614	0.79606	0.79598	0.79589	0.79581	0.79572	0.79564	0.79555	0.79547	0.79538
13.	0.79530	0.79521	0.79513	0.79504	0.79496	0.79487	0.79479	0.79470	0.79462	0.79453
14.	0.79445	0.79436	0.79428	0.79419	0.79411	0.79402	0.79394	0.79385	0.79377	0.79368
15.	0.79360	0.79352	0.79343	0.79335	0.79326	0.79318	0.79309	0.79301	0.79292	0.79284
16.	0.79275	0.79267	0.79258	0.79250	0.79241	0.79232	0.79224	0.79215	0.79207	0.79198
17.	0.79190	0.79181	0.79173	0.79164	0.79156	0.79147	0.79139	0.79130	0.79122	0.79113
18.	0.79105	0.79096	0.79088	0.79079	0.79071	0.79062	0.79054	0.79045	0.79037	0.79028
19.	0.79020	0.79011	0.79002	0.78994	0.78985	0.78977	0.78968	0.78960	0.78951	0.78943
20.	0.78934	0.78926	0.78917	0.78909	0.78900	0.78892	0.78883	0.78874	0.78866	0.78857
21.	0.78849	0.78840	0.78832	0.78823	0.78815	0.78806	0.78797	0.78789	0.78780	0.78772
22.	0.78763	0.78755	0.78746	0.78738	0.78729	0.78720	0.78712	0.78703	0.78695	0.78686
23.	0.78678	0.78669	0.78660	0.78652	0.78643	0.78635	0.78626	0.78618	0.78609	0.78600
24.	0.78592	0.78583	0.78575	0.78566	0.78558	0.78549	0.78540	0.78532	0.78523	0.78515
25.	0.78506	0.78497	0.78489	0.78480	0.78472	0.78463	0.78454	0.78446	0.78437	0.78429
26.	0.78420	0.78411	0.78403	0.78394	0.78386	0.78377	0.78368	0.78360	0.78351	0.78343
27.	0.78334	0.78325	0.78317	0.78308	0.78299	0.78291	0.78282	0.78274	0.78265	0.78256
28.	0.78248	0.78239	0.78230	0.78222	0.78213	0.78205	0.78196	0.78187	0.78179	0.78170
29.	0.78161	0.78153	0.78144	0.78136	0.78127	0.78118	0.78110	0.78101	0.78092	0.78084
30.	0.78075	0.78066	0.78058	0.78049	0.78040	0.78032	0.78023	0.78014	0.78006	0.77997

ANEXO V

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL CALORÍMETRO DIFERENCIAL DE BARRIDO NETZSCH DSC F1 204 PHOENIX

En la Tabla A V.1 se presentan los barridos realizados para cada estándar de acuerdo a lo especificado en el manual del equipo "Software Manual DSC Instruments, Temperature and Sensitivity Calibration":

Tabla A V.1. Pasos efectuados en el DSC Netzsch 204 F1 Phoenix para cada estándar a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min

Estándares	Barridos
Hg	Calentamiento: -60 °C a -15 °C Enfriamiento: -15 °C a -60 °C Calentamiento: -60 °C a -15 °C Enfriamiento: -15 °C a -60 °C Calentamiento: -60 °C a 25 °C
In	Calentamiento: 20 °C a 210 °C Enfriamiento: 210 °C a 50 °C Calentamiento: 50 °C a 210 °C Enfriamiento: 210 °C a 50 °C Calentamiento: 50 °C a 210 °C
Sn	Calentamiento: 20 °C a 280 °C Enfriamiento: 280 °C a 130 °C Calentamiento: 130 °C a 280 °C Enfriamiento: 280 °C a 130 °C Calentamiento: 130 °C a 280 °C
Bi	Calentamiento: 20 °C a 320 °C Enfriamiento: 320 °C a 170 °C Calentamiento: 170 °C a 320 °C Enfriamiento: 320 °C a 170 °C Calentamiento: 170 °C a 320 °C
Zn	Calentamiento: 20 °C a 470 °C Enfriamiento: 470 °C a 320 °C Calentamiento: 320 °C a 470 °C Enfriamiento: 470 °C a 320 °C Calentamiento: 320 °C a 470 °C

Tanto para calibración de temperatura como para la de entalpía se utilizaron los dos últimos calentamientos de cada estándar para determinar la temperatura

inicio (onset) y el área del pico de fusión. A continuación se muestran los termogramas de los estándares. Las curvas en color azul corresponden al segundo calentamiento mientras que las de color rojo pertenecen al tercer calentamiento.

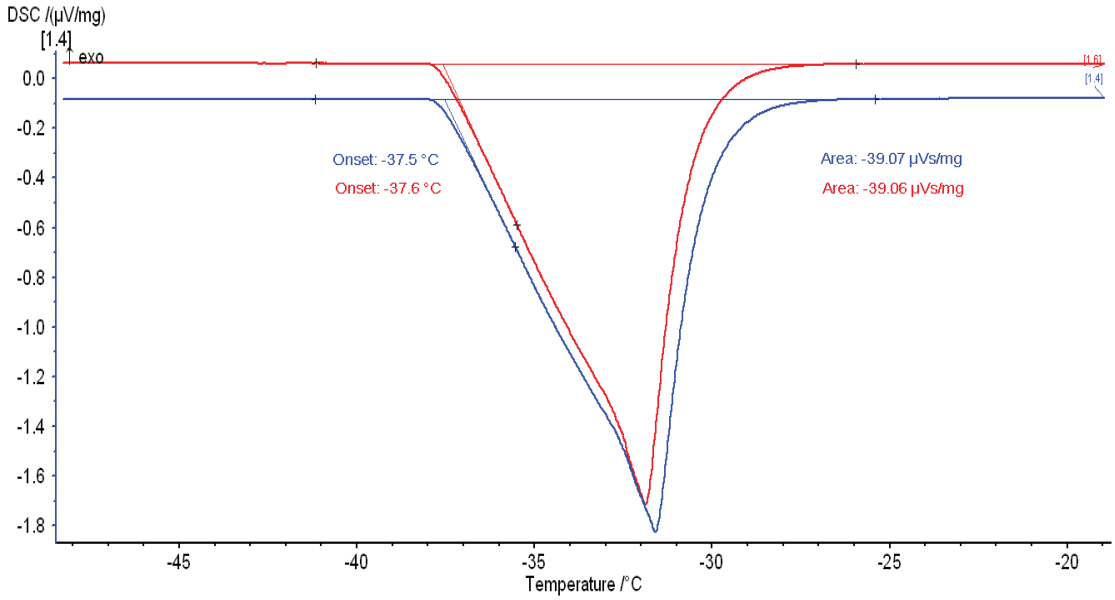


Figura A V.1. Termograma del segundo y tercer calentamiento del Hg obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva

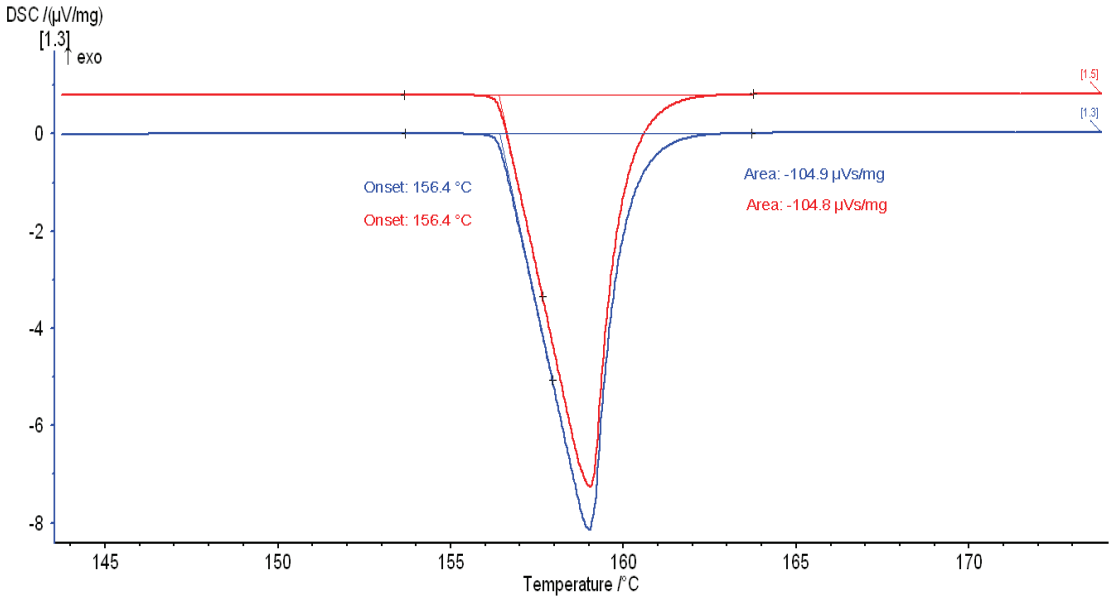


Figura A V.2. Termograma del segundo y tercer calentamiento del In obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva

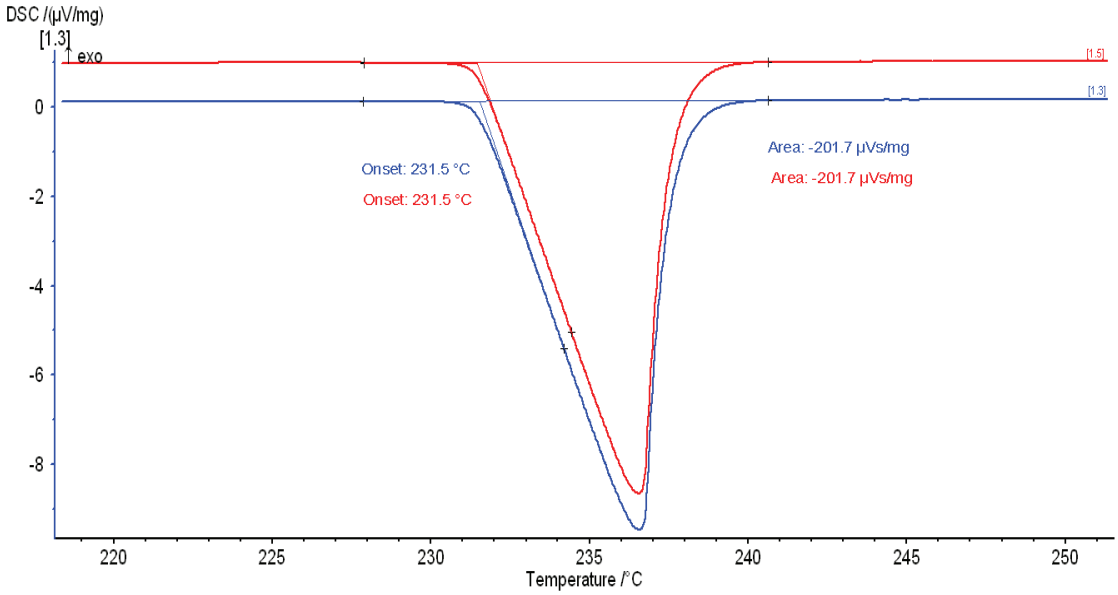


Figura A V.3. Termograma del segundo y tercer calentamiento del Sn obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva

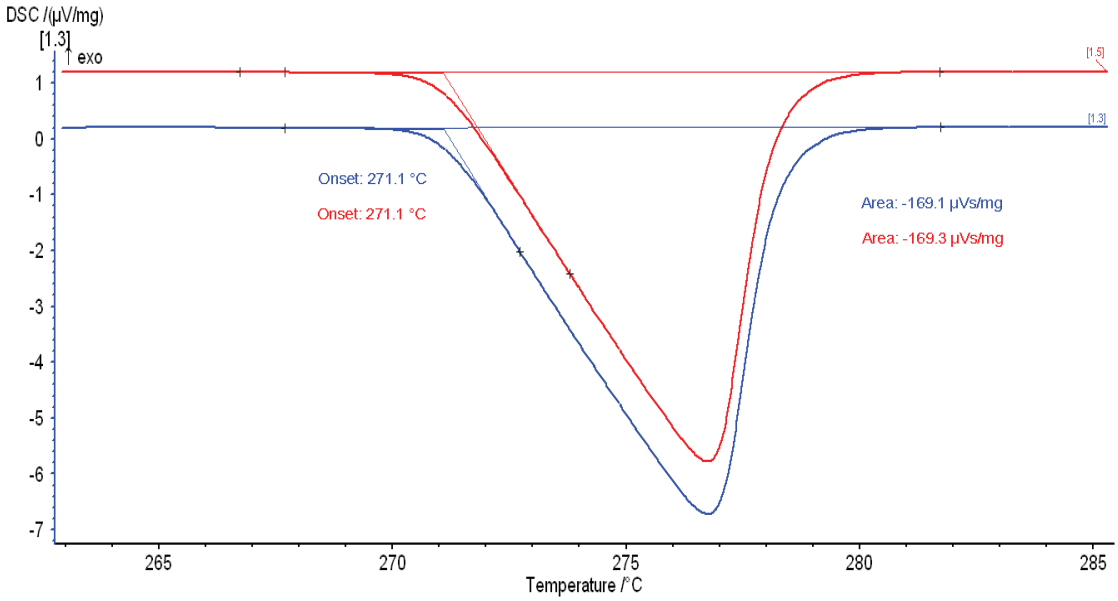


Figura A V.4. Termograma del segundo y tercer calentamiento del Bi obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva

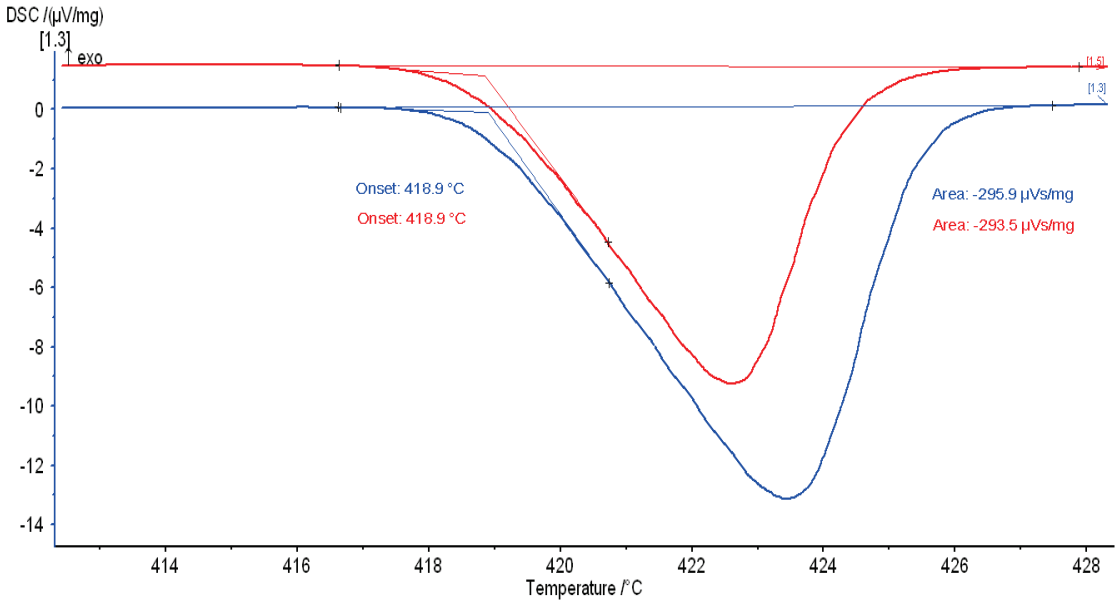


Figura A V.5. Termograma del segundo y tercer calentamiento del Zn obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio y el área bajo la curva

- Calibración de temperatura

En la Tabla A V.2 se resumen los valores de temperatura inicial obtenidos del análisis de los termogramas anteriores.

Tabla A V.2. Valores de temperatura inicial de los estándares correspondientes al segundo y tercer calentamiento a 10 °C/min

Estándar	Temperatura inicial (ºC)		Temperatura inicial promedio (ºC)
	2º Calentamiento	3º Calentamiento	
Hg	-37,5	-37,6	-37,5
In	156,4	156,4	156,4
Sn	231,5	231,5	231,5
Bi	271,1	271,1	271,1
Zn	418,8	418,9	418,9

Los datos de temperatura inicial promedio fueron ingresados en el programa de calibración del software Netzsch Proteus en la columna denominada “Temp. exp.”

Posteriormente el software calcula la columna “Temp. corr.” Tal como se aprecia en la Figura A V.6.

	Substance	Temp. nom. /°C	Temp. exp. /°C	Mathematical Weight	Temp. corr. /°C
1	Hg	-38.8	-37.5	5.000	-38.8
2	In	156.6	156.4	10.000	156.6
3	Sn	231.9	231.5	1.000	232.0
4	Bi	271.4	271.1	1.000	271.7
5	Zn	419.5	418.9	5.000	419.5

Figura A V.6. Ventana del programa de calibración para temperatura del software Netzsch Proteus

La columna “Temp. nom.” corresponde a los valores de temperatura inicial referenciales de cada estándar. La columna Mathematical Weight, se usó para ajustar los datos a la curva de calibración. Siempre se debe considerar que el In tiene el mayor peso matemático, en este caso 10.

El software calcula y grafica “Temp. nom.” – “Temp. exp.” vs. “Temp. exp.” para conseguir la curva de calibración. Debe existir una diferencia máxima de ±3 °C entre “Temp. nom.” y “Temp corr.” Para aceptar la curva de calibración tal como se aprecia en la tabla A V.3.

Tabla A V.3. Diferencia máxima permitida entre “Temp. nom.” y “Temp. corr.”

Estándar	Temperatura (ºC)		Temp. nom. – Temp. corr. (máximo ± 3 °C)
	nom.	corr.	
Hg	-38,8	-38,8	0,0
In	156,6	156,6	0,0
Sn	231,9	232,0	-0,1
Bi	271,4	271,7	-0,3
Zn	419,5	419,5	0,0

- Calibración de entalpía

De igual manera, en la Tabla A V.4 se presentan los valores resumidos del área del pico de fusión de los termogramas de los estándares.

Tabla A V.4. Áreas de los picos de fusión de los estándares correspondientes al segundo y tercer calentamiento a 10 °C/min

Estándar	Área del Pico (uV*s/mg)		Área promedio (uV*s/mg)
	2º Calentamiento	3º Calentamiento	
Hg	-39,06	-39,07	-39,065
In	-104,80	-104,90	-104,850
Sn	-201,70	-201,70	-201,700
Bi	-169,30	-169,10	-169,200
Zn	-293,50	-295,50	-294,500

Los datos del área promedio se ingresaron en el programa de calibración del software Netzsch Proteus en la columna denominada “Peak Area” y el software determinó las columnas “Sensit. Exp.” y “Sensit. Calc.”. Esto se aprecia en la Figura A V.7.

	Substance	Temp. /oC	Enthalpy J/g	Peak Area uV's/mg	Sensit.Exp uV/mW	Mathem. Weighting	Sensit. Calc. uV/mW
1	Hg	-38.8	-11.400	-39.065	3.427	5.000	3.414
2	Indium	156.6	-28.600	-104.850	3.666	10.000	3.632
3	Sn	231.9	-60.500	-201.700	3.334	5.000	3.415
4	Bi	271.4	-53.100	-169.200	3.186	5.000	3.244
5	Zn	419.5	-107.500	-294.500	2.740	1.000	2.378

Figura A V.7. Ventana del programa de calibración para entalpía del software Netzsch Proteus

De igual manera que para la temperatura, la columna Mathematical Weight se usó para ajustar los datos a la curva de calibración de tal manera que el In tenga el mayor peso matemático. El software grafica “Sensit. Calc.” Vs. “Temp.” para conseguir la curva de calibración

La desviación máxima permitida entre la sensibilidad calculada y la experimental debe ser de ± 3%. En la Tabla A V.5 se presenta dicha desviación.

Tabla A V.5. Desviación permitida entre sensibilidad calculada y experimental

Estándar	Área del Pico (uV*s/mg)		Desviación (%)
	Sensit. Calc.	Sensit. Exp.	
Hg	3,414	3,427	-0,38
In	3,632	3,666	-0,94
Sn	3,415	3,334	2,37
Bi	3,244	3,186	1,79
Zn	2,378	2,74	-15,22

- Validación

Se presentan a continuación los termogramas de los estándares Hg, In y Sn utilizados para la validación de la calibración. Las curvas de color azul, rojo y verde representan a al primer, segundo y tercer calentamientos respectivamente.

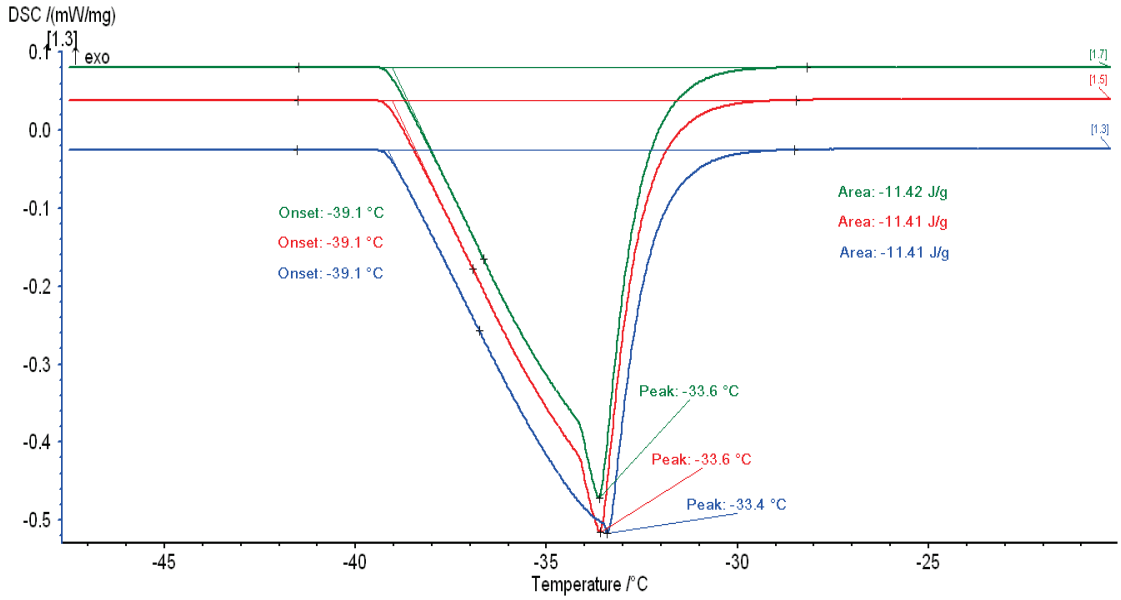


Figura A V.8. Termograma de los tres calentamientos del Hg obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio, temperatura y entalpía de fusión

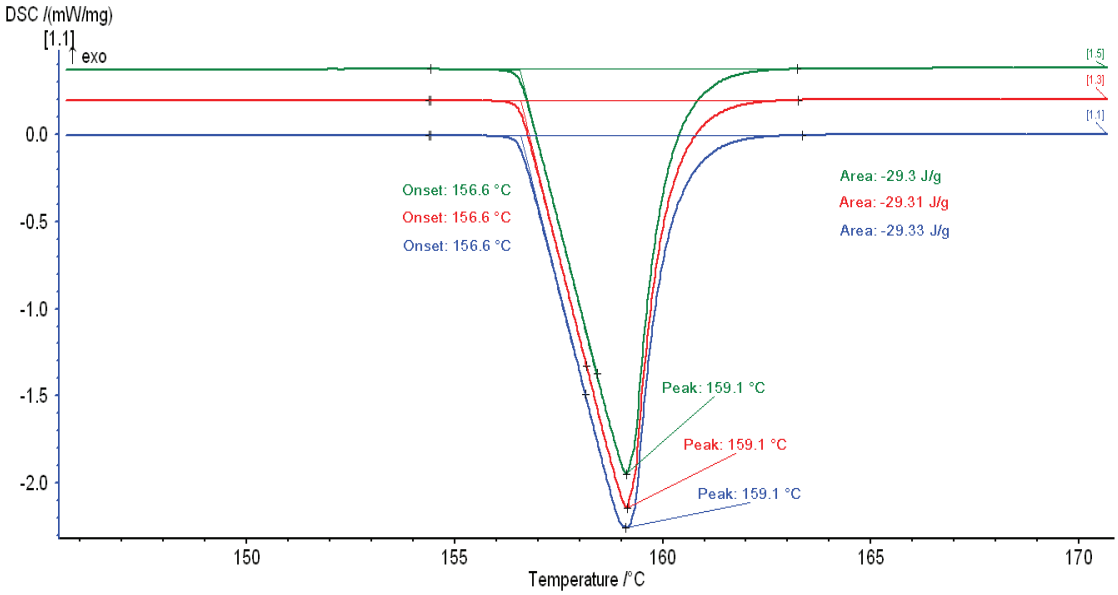


Figura A V.9. Termograma de los tres calentamientos del In obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio, temperatura y entalpía de fusión

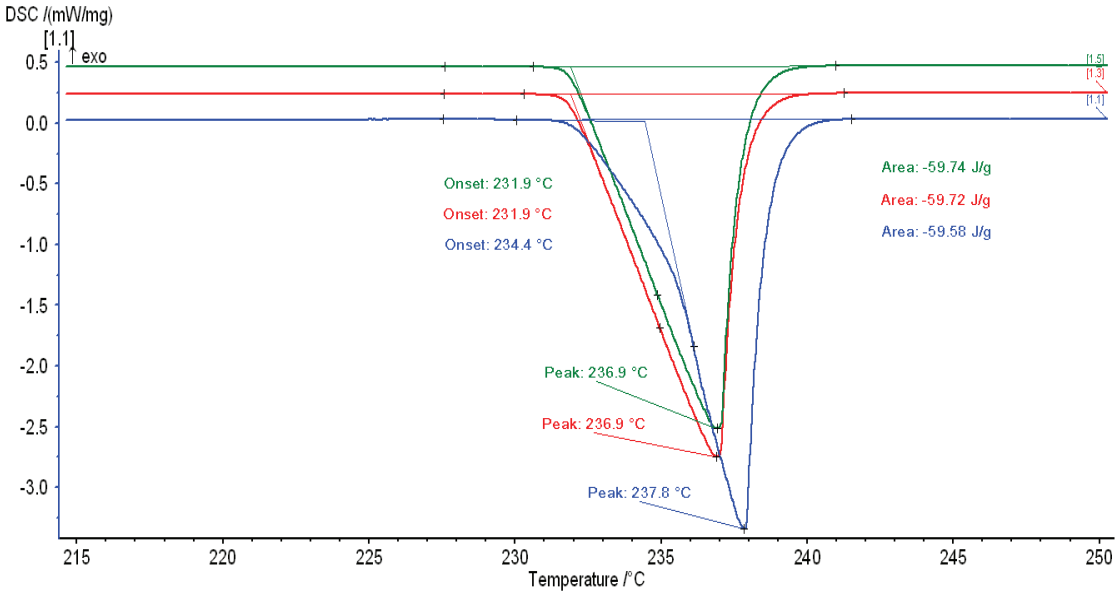


Figura A V.10. Termograma de los tres calentamientos del Sn obtenido a 10 °C/min. Se registra la temperatura inicio, temperatura y entalpía de fusión

En las Tablas A V.6, A V.7 y A V.8 se especifican los valores de temperatura inicial, temperatura de fusión y entalpía de fusión respectivamente luego de analizar los termogramas anteriores.

Tabla A V.6. Temperatura inicial del Hg, In y Sn

Temperatura Onset (°C)				Promedio	Desviación Estándar
Estándar	**1° Calentamiento**	**2° Calentamiento**	**3° Calentamiento**		
Hg	-39,1	-39,1	-39,1	-39,1	0
In	156,6	156,6	156,6	156,6	0
Sn	234,4	231,9	231,9	232,7	1,4

Tabla A V.7. Temperatura de fusión del Hg, In y Sn

Temperatura de Fusión (°C)				Promedio	Desviación Estándar
Estándar	**1° Calentamiento**	**2° Calentamiento**	**3° Calentamiento**		
Hg	-33,4	-33,6	-33,6	-33,5	0,1
In	159,1	159,1	159,1	159,1	0,0
Sn	237,8	236,9	236,9	237,2	0,5

Tabla A V.8. Entalpía de fusión del Hg, In y Sn

Entalpía de Fusión (J/g)				Promedio	Desviación Estándar
Estándar	**1° Calentamiento**	**2° Calentamiento**	**3° Calentamiento**		
Hg	11,41	11,41	11,42	11,41	0,01
In	29,33	29,31	29,3	29,31	0,02
Sn	59,58	59,72	59,74	59,68	0,09

ANEXO VI

DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE LAS POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS USADAS PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS

Primeramente se determinó las densidades de las mezclas con la ecuación A VI.1.

$$\rho_M = \rho_1 \times x_1 + \rho_2 \times x_2 \qquad \text{[A VI.1]}$$

Donde:

ρ_M = densidad de la mezcla (g/cm^3)
ρ_1 = densidad del componente 1 (g/cm^3)
ρ_2 = densidad del componente 2(g/cm^3)
x_1 = fracción en peso del componente 1
x_2 = fracción en peso del componente 2

Luego se calculó las masas de las mezclas con la ecuación A VI.2.

$$m = \rho_M \times V_n \times f \qquad \text{[A VI.2]}$$

Donde:

m = masa de la mezcla (g)
ρ_M = densidad de la mezcla (g/cm^3)
V_n = volumen neto de la cámara (cm^3)
f = fracción de llenado

De acuerdo al manual de operación del Reómetro Haake modelo Rheomix 600P, el volumen de llenado cuando se trabaja con rotores Roller es de 69 cm^3 y la fracción de llenado sugerida es de 0,7.

- Ejemplo de cálculo para el sistema PEAD/PP al 5% de PP

$$\rho_M = 0{,}8894 \times 0{,}05 + 0{,}9406 \times 0{,}95 = 0{,}9380 \frac{g}{cm^3} \quad \text{[A VI.3]}$$

$$m = 0{,}9380 \times 69 \times 0{,}7 = 45{,}3064\ g \quad \text{[A VI.4]}$$

$$m_{PP} = 45{,}3064 \times 0{,}05 = 2{,}2653\ g \quad \text{[A VI.5]}$$

$$m_{PEAD} = 45{,}3064 \times 0{,}95 = 43{,}0411\ g \quad \text{[A VI.6]}$$

Tabla A VI.1. Masas de los componentes individuales para la selección de polietilenos en el sistema PEBD/PELBD. Las masas corresponden a la mezcla PEBD Hanwha con tres PELBD Braskem, Dowlex y Taisox al 5% w/w

Concentración	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa Hanwha (g)	Masa PELBD (g)
5% Braskem	0,9206	44,4649	42,2417	2,2232
5% Dowlex	0,9207	44,4720	42,2484	2,2236
5% Taisox	0,9207	44,4718	42,2482	2,2236

Tabla A VI.2. Masas de los componentes individuales para la selección de polietilenos en el sistema PEBD/PELBD. Las masas corresponden a la mezcla PEBD Dow con tres PELBD Braskem, Dowlex y Taisox al 5% w/w

Concentración	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa Dow (g)	Masa PELBD (g)
5% Braskem	0,9204	44,4535	42,2308	2,2227
5% Dowlex	0,9205	44,4606	42,2376	2,2230
5% Taisox	0,9205	44,4604	42,2374	2,2230

Tabla A VI.3. Masas de los componentes individuales para la selección de polietilenos en el sistema PEBD/PELBD. Las masas corresponden a la mezcla PEBD Lotrene con tres PELBD Braskem, Dowlex y Taisox al 5% w/w

Concentración	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa Lotrene (g)	Masa PELBD (g)
5% Braskem	0,9197	44,4208	42,1997	2,2210
5% Dowlex	0,9198	44,4279	42,2065	2,2214
5% Taisox	0,9198	44,4277	42,2063	2,2214

Tabla A VI.4. Masas de los componentes individuales para el sistema PEBD/PELBD. Estos datos corresponden a las concentraciones preliminares

Concentración	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa Hanwha (g)	Masa Braskem (g)
5% Braskem	0,9206	44,4649	42,2417	2,2232
10% Braskem	0,9204	44,4541	40,0087	4,4454
90% Braskem	0,9168	44,2811	4,4281	39,8530
95% Braskem	0,9166	44,2703	2,2135	42,0568

Tabla A VI.5. Masas de los componentes individuales para el sistema PEBD/PELBD. Estos datos corresponden a las concentraciones definitivas

Concentración	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa Hanwha (g)	Masa Braskem (g)
5% Braskem	0,9206	44,4649	42,2417	2,2232
10% Braskem	0,9204	44,4541	40,0087	4,4454
15% Braskem	0,9202	44,4433	37,7768	6,6665
80% Braskem	0,9199	44,4325	35,5460	8,8865

Tabla A VI.6. Masas de los componentes individuales para el sistema PEAD/PP

Concentración	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa PP (g)	Masa PEAD (g)
5% PP	0,9380	45,3064	2,2653	43,0411
10% PP	0,9355	45,1828	4,5183	40,6645
90% PP	0,8945	43,2049	38,8844	4,3205
95% PP	0,8920	43,0813	40,9272	2,1541

Tabla A VI.7. Masas de los componentes individuales para el sistema PEAD/PP con materiales reciclados

Mezcla	Densidad de la mezcla (g/cm^3)	Masa de la mezcla (g)	Masa PEAD (g)	Masa PP (g)
PEAD/PP 95/5	0,9484	45,8083	43,5179	2,2904

ANEXO VII

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL FUNDIDO DE LA MEZCLA RECICLADA PEAD/PP 95/5

La densidad fue determinada de acuerdo a la Ecuación A VII.1 que especifica a continuación:

$$Densidad = \frac{Peso}{\frac{MVRe \times t}{10 \times 60}} \qquad \text{[A VII.1]}$$

- Ejemplo de cálculo para la porción 1:

$$Densidad = \frac{0{,}0593}{\frac{(0{,}785 \times 67{,}90)}{(10 \times 60)}} = 0{,}668\ g/cm^3 \qquad \text{[A VII.2]}$$

Tabla A VII.1. Valores para la determinación de la densidad del fundido de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5

Porción	t (s)	Peso (g)	MVRe (cm^3/10min)	Densidad (g/cm^3)	Promedio (g/cm^3)	Desviación Estándar
1	67,90	0,0593	0,785	0,668	0,740	0,046
2	75,29	0,0698	0,740	0,752		
3	74,55	0,0646	0,712	0,730		
4	80,38	0,0731	0,691	0,790		
5	76,27	0,0671	0,694	0,761		

ANEXO VIII

MASAS DE LAS POLIOLEFINAS VÍRGENES, RECICLADAS Y DE LAS MEZCLAS USADAS EN LOS ENSAYOS TÉRMICOS

Tabla A VIII.1. Masas de las poliolefinas vírgenes y de las celdas usadas para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión

Poliolefina	1° Corrida		2° Corrida		3° Corrida	
	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
PEAD	7,35	38,87	7,67	39,20	7,80	38,88
PEBD Dow	5,15	38,73	7,36	38,74	7,52	39,13
PEBD Hanwha	7,22	38,75	7,74	38,83	7,69	38,83
PEBD Lotrene	7,68	38,90	7,47	38,77	5,47	38,75
PELBD Braskem	7,29	39,03	7,68	39,12	7,47	38,89
PELBD Dowlex	6,98	38,93	6,88	38,93	3,67	38,50
PELBD Taisox	8,16	38,78	8,54	39,54	8,99	38,99
PP	5,82	39,17	5,60	38,75	5,63	38,94

Tabla A VIII.2. Masas de las poliolefinas vírgenes y de las celdas usadas para la determinación de la temperatura de transición vítrea

Poliolefina	1° Corrida		2° Corrida		3° Corrida	
	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
PEAD	16,12	40,00	-	-	-	-
PEBD Hanwha	18,27	38,66	-	-	-	-
PELBD Braskem	15,84	38,79	-	-	-	-
PP	14,90	38,27	15,06	38,79	16,23	38,86

Tabla A VIII.3. Masas de las mezclas PEAD/PP y PEBD/PELBD y de las celdas usadas en la determinación de la temperatura de transición vítrea

Sistema	Concentración	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
PEAD/PP	95/5	14,89	38,99
	90/10	16,12	38,63
	10/90	17,85	38,55
	5/95	17,62	38,78
PEBD/PELBD	95/5	15,86	38,98
	90/10	14,69	38,92
	85/15	15,34	38,91
	80/20	13,41	39,11

Tabla A VIII.4. Masas de las muestras y de las celdas usadas para la selección del sistema PEBD/PELBD. La concentración de todas las mezclas es de 95/5 (%w/w) para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión

Mezcla PEBD/PELBD 95/5 (% w/w)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
Hanwha/Dowlex	7,71	39,1
Hanwha/Taisox	7,81	38,8
Hanwha/Braskem	6,65	38,57
Lotrene/Dowlex	6,22	38,61
Lotrene/Taisox	8,06	39,15
Lotrene/Braskem	6,82	38,7
Dow/Dowlex	8,73	38,87
Dow/Taisox	6,24	38,75
Dow/Braskem	9,5	38,65

Tabla A VIII.5. Masas de la mezcla PEAD/PP y de las celdas usadas para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión

Mezcla PEAD/PP (% w/w)	1° Corrida		2° Corrida		3° Corrida	
	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
95/5	4,54	38,46	7,20	38,69	7,06	38,33
90/10	7,06	38,87	7,44	38,94	7,67	38,78
10/90	6,03	38,88	7,17	38,73	7,33	38,93
5/95	6,90	38,79	7,13	38,71	7,30	38,84

Tabla A VIII.6. Masas de la mezcla PEBD Hanwha/PELBD Braskem y de las celdas usadas en los ensayos térmicos para la determinación de la temperatura de cristalización, temperatura y entalpía de fusión

Mezcla PEBD Hanwha/ PELBD Braskem (% w/w)	1° Corrida		2° Corrida		3° Corrida	
	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
95/5	6,65	38,57	7,39	38,90	5,62	39,03
90/10	9,26	38,73	7,64	38,87	7,39	38,72
85/15	5,22	38,81	7,76	38,44	7,60	38,86
80/20	7,63	39,10	5,81	38,64	7,78	38,64

Tabla A VIII.7. Masas de las poliolefinas y de la mezcla reciclada así como de las celdas usadas en los ensayos térmicos para la determinación de la temperatura transición vítrea y la temperatura y entalpía de fusión

Poliolefina	Masa de la muestra (mg)	Masa de la celda (mg)
PEAD	8,69	39,02
PP	4,77	38,5
PEAD/PP 95/5 T_f	8,01	39,06
PEAD/PP 95/5 T_g	13,81	38,89

ANEXO IX

TERMOGRAMAS DE LA DETERMINACIÓN DE LA MISCIBILIDAD DE LOS SISTEMAS PEAD/PP, PEBD/PELBD Y DE LA MEZCLA RECICLADA A TRAVÉS DE LA Tg

En las Figuras A IX.1 hasta A IX.9 se presentan los termogramas con los que se determinaron las temperaturas de transición vítreas de las mezclas elaboradas.

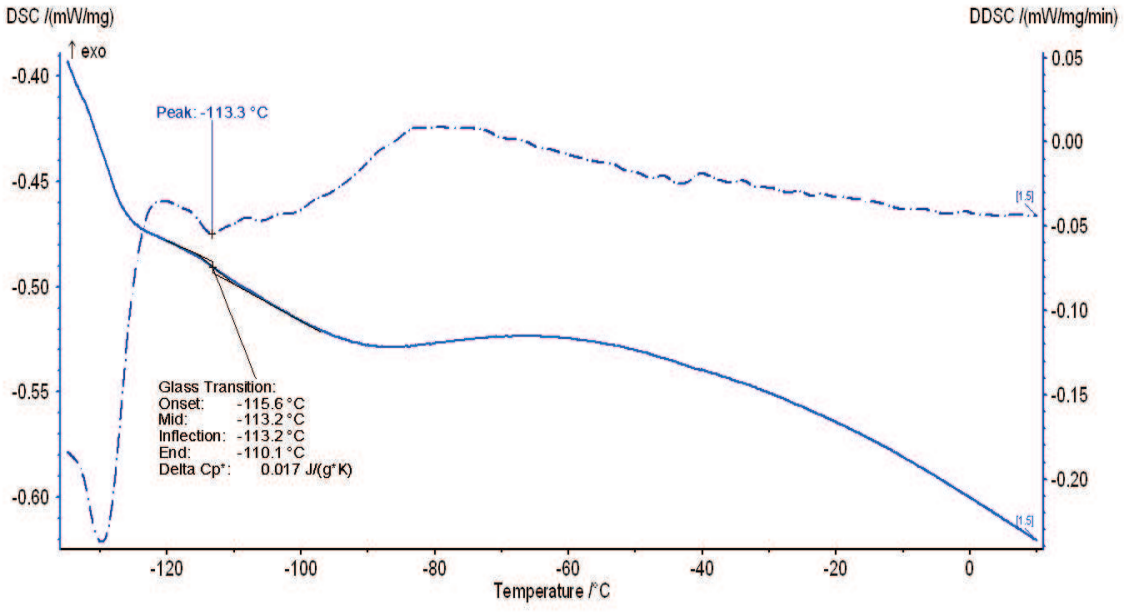


Figura A IX.1. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min

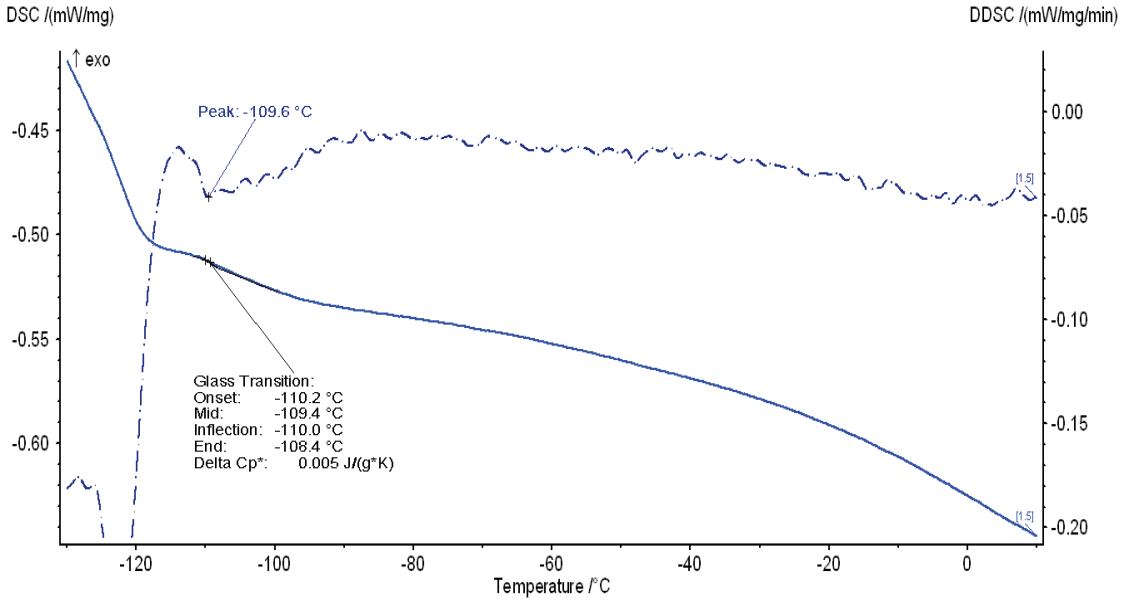


Figura A IX.2. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 90/10 a 20 °C/min

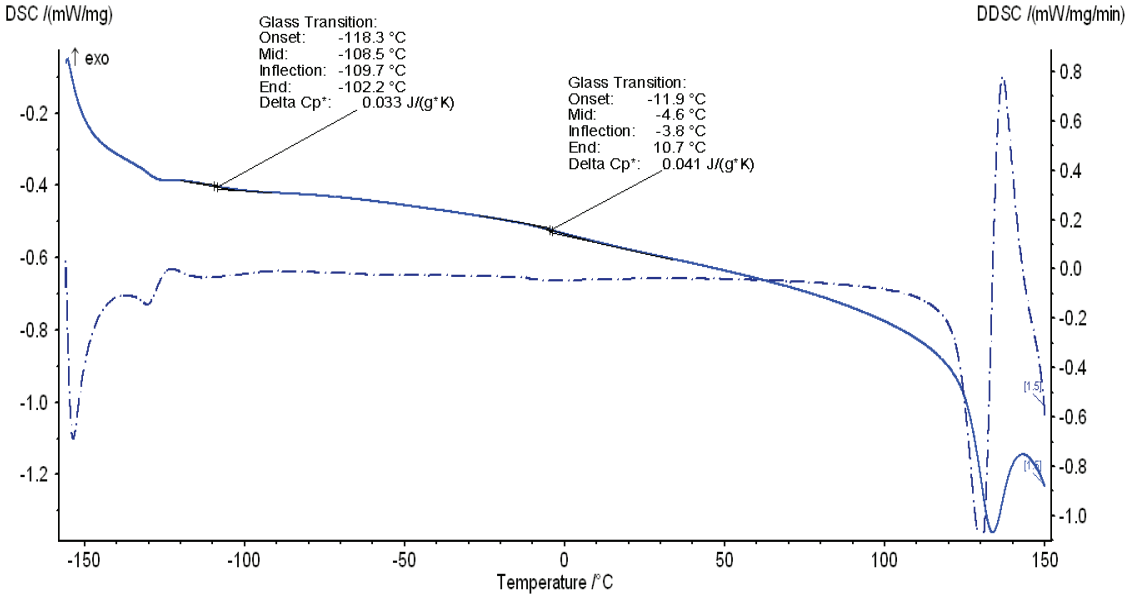


Figura A IX.3. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 10/90 a 20 °C/min

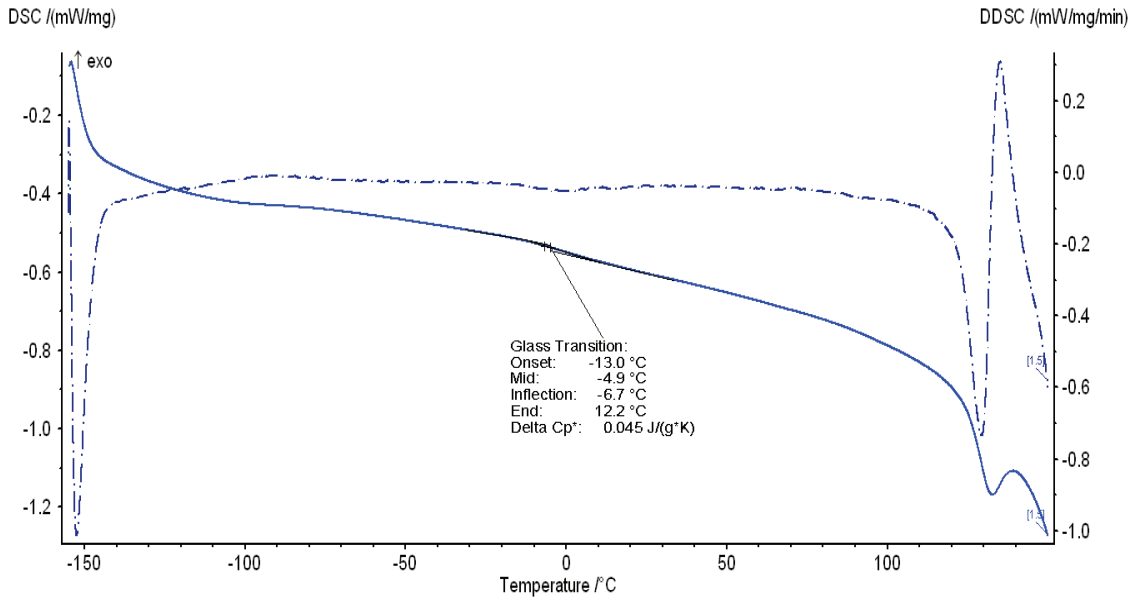


Figura A IX.4. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEAD/PP 5/95 a 20 °C/min

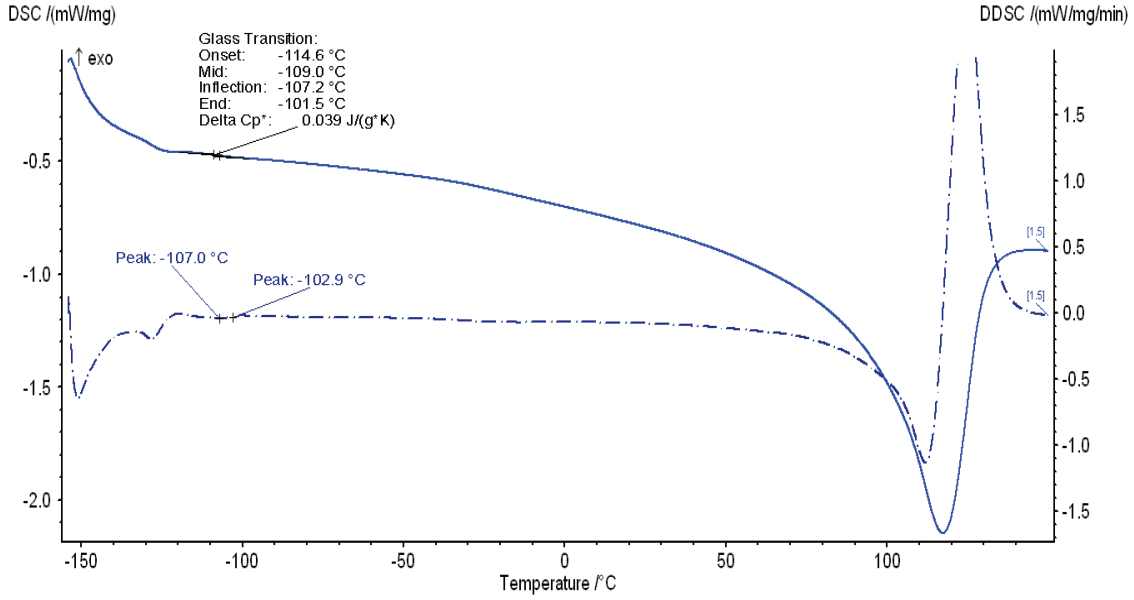


Figura A IX.5. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 95/5 a 20 °C/min

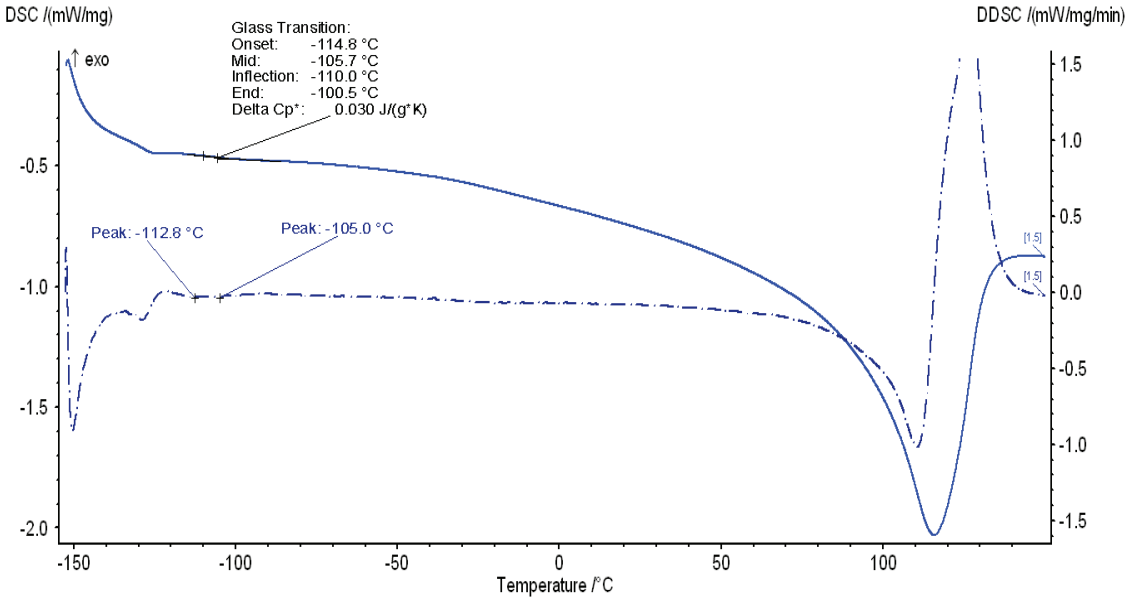


Figura A IX.6. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 90/10 a 20 °C/min

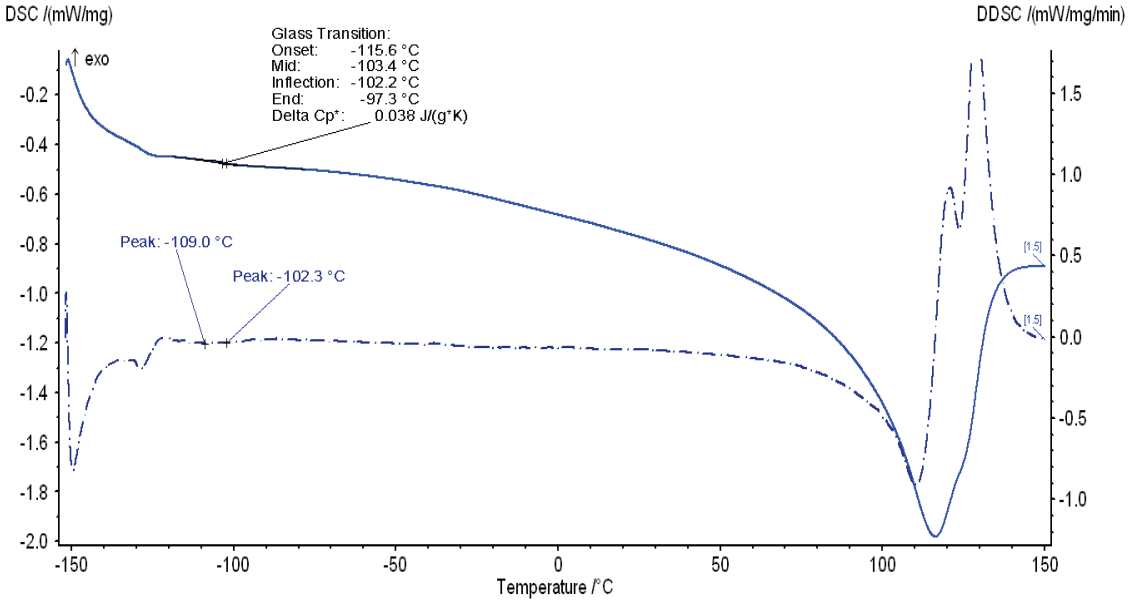


Figura A IX.7. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 85/15 a 20 °C/min

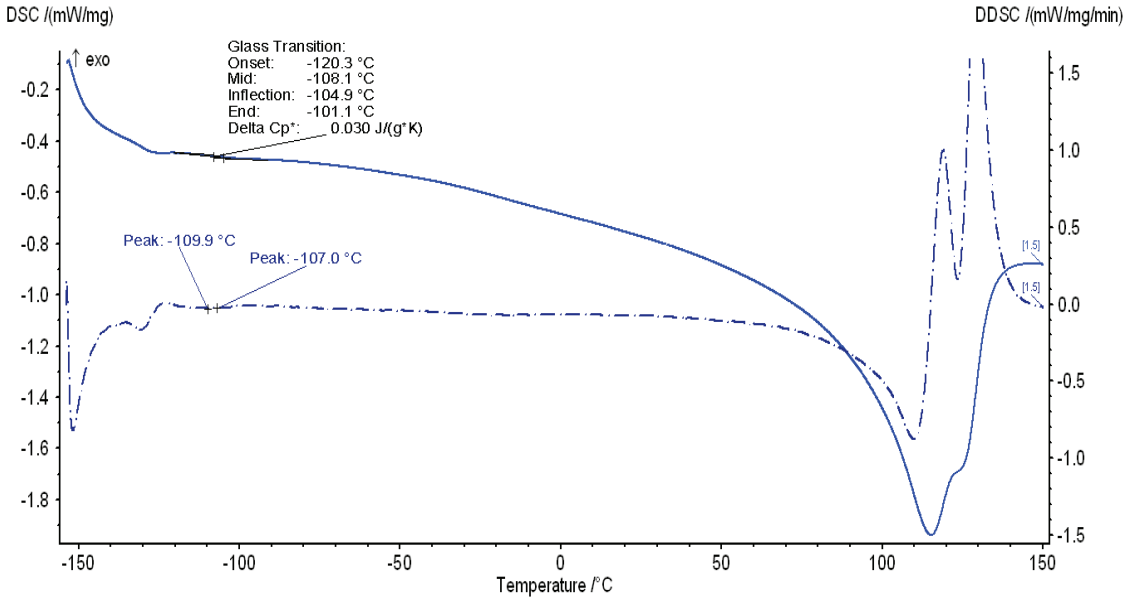


Figura A IX.8. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla PEBD/PELBD 80/20 a 20 °C/min

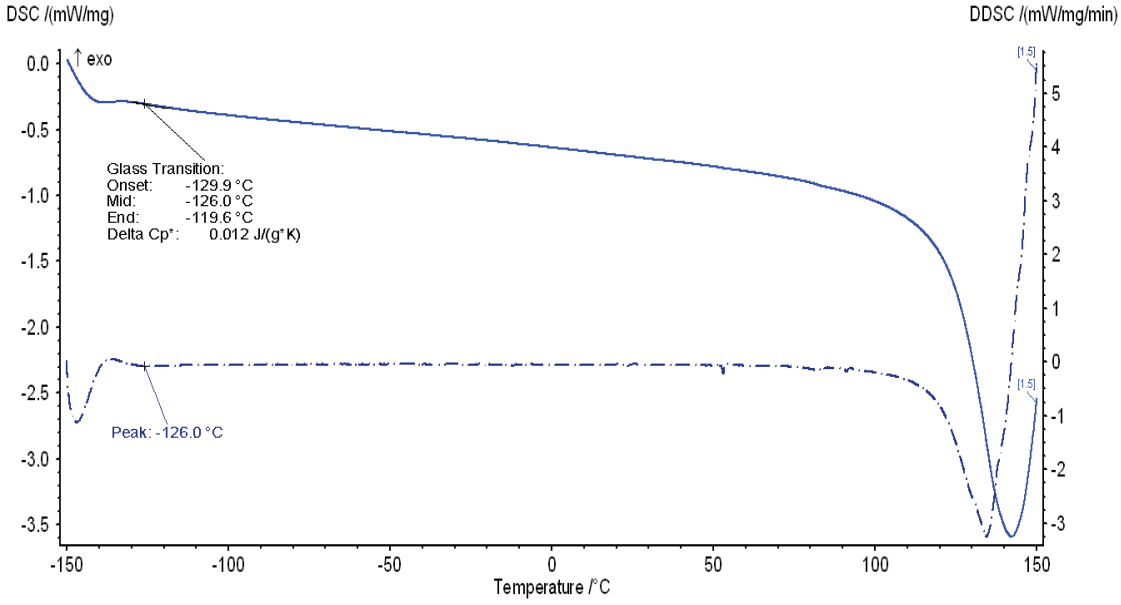


Figura A IX.9. Termograma correspondiente al segundo calentamiento de la mezcla reciclada PEAD/PP 95/5 a 20 °C/min

ANEXO X

CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA DE MEZCLADO DE POLIOLEFINAS COMERCIALES Y RECICLADAS

- Capacidad de la planta

De los residuos sólidos generados en Quito 13,12% es plástico. De aquí se recicla alrededor del 8% y de esta cantidad 3% son poliolefinas.

$$1500\frac{t}{día} \times 0{,}1312 = 196{,}8\frac{t\ plástico}{día} \quad [A\ X.1]$$

$$196{,}8\frac{t\ plástico}{día} \times 0{,}08 \times 0{,}03 = 0{,}47\frac{t\ poliolefinas}{día} \quad [A\ X.2]$$

$$0{,}47\frac{t}{día} \times \frac{10^3 kg}{1\ t} = 470\frac{kg\ mezcla}{día} \quad [A\ X.3]$$

- Balance de masa

$$470\frac{kg\ mezcla}{día} \times \frac{1\ día}{8\ h} = 58{,}75\frac{kg\ mezcla}{h} \quad [A\ X.4]$$

$$58{,}75\frac{kg\ mezcla}{h} \times \frac{5\ kg\ PP}{100\ kg\ mezcla} = 2{,}94\frac{kg\ PP}{h} \quad [A\ X.5]$$

$$58{,}75\frac{kg\ mezcla}{h} \times \frac{95\ kg\ PEAD}{100\ kg\ mezcla} = 55{,}81\frac{kg\ PEAD}{h} \quad [A\ X.6]$$

- Balance de energía

Para el enfriamiento se tomó como ejemplo de cálculo la mezcla comercial

$$Qagua = Qmezcla \quad [A\ X.7]$$

$$m_{agua} \times cp_{agua} \times \ T_{ea} - T_{sa} \ = m_{mezcla} \times cp_m \times \ T_{em} - T_{sm} \quad [A\ X.8]$$

$$m_{agua} = \frac{m_{polímero} \times cp_m \times \ T_{em} - T_{sm}}{cp_{agua} \times \ T_{ea} - T_{sa}} \quad [A\ X.9]$$

Cálculo de la capacidad calórica de la mezcla:

$$cp_m = x_{PEAD} \times cp_{PEAD} + x_{PP} \times cp_{PP} \quad \text{[A X.10]}$$

$$cp_M = 0{,}95 \times 2{,}25 \frac{J}{g°C} + 0{,}005 \times 2{,}1 \frac{J}{g°C} = 2{,}24 \ \frac{J}{g°C} \quad \text{[A X.11]}$$

Determinación de la cantidad de agua de enfriamiento:

$$m_{agua} = \frac{58{,}750 \frac{kg}{h} \times 2242{,}5 \frac{J}{kg°C} \times \ 220-60 \ °C}{4180 \frac{J}{kg°C} \times \ 35-10 \ °C} \quad \text{[A X.12]}$$

$$m_{agua} = 201{,}72 \ \frac{kg}{h} = 0{,}2017 \frac{m^3}{h} \quad \text{[A X.13]}$$

Para el secado:

Tabla A X.1. Valores para la determinación del porcentaje de agua adherida a la mezcla luego del enfriamiento

Masa inicial (g)	Masa final (g)	Cantidad de agua (%)	Promedio	Desviación Estándar
0,5091	0,5113	0,4	0,5	0,1
0,5764	0,5801	0,6		
0,7667	0,7707	0,5		

$$Qagua = Qconvección \ aire \quad \text{[A X.14]}$$

$$m_{agua} \times cp_{agua} \times \ T_{eb} - T_{pared} \ + m_{agua} \times \lambda_{agua} = h \times A \times \ T_{media} - T_{\infty} \quad \text{[A X.15]}$$

$$h = \frac{m_{agua} \times cp_{agua} \times \ T_{eb} - T_{pared} \ + m_{agua} \times \lambda_{agua}}{A \times \ T_{media} - T_{\infty}} \quad \text{[A X.16]}$$

Cálculo del área lateral de la mezcla extruida:

$$A = Área \ lateral \ de \ la \ mezcla \quad \text{[A X.17]}$$

Se tomó el máximo diámetro para un pellet que es de 5 mm. La altura corresponde al ancho de la boquilla rectangular por donde es expulsado el aire del secador. En la Figura AX.1 se muestra un esquema del perfil tipo “tallarín” usado.

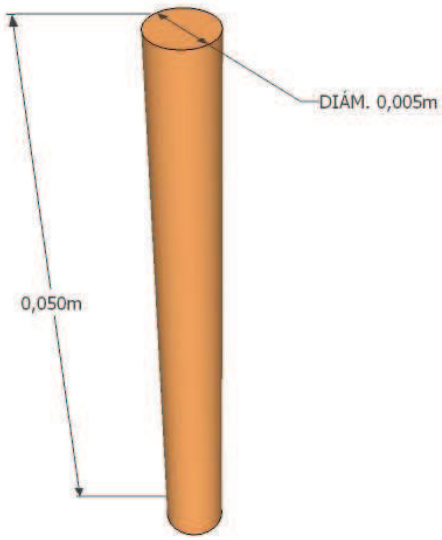


Figura A X.1. Características geométricas del perfil extruido tipo “tallarín”

$$At = Área\ lateral\ de\ 1\ filamento \qquad [A\ X.18]$$

$$At = 2 \times \pi \times r \times l = 2 \times \pi \times 0{,}0025m \times 0{,}05m = 7{,}854 \times 10^{-4}\ m^2 \qquad [A\ X.19]$$

Para obtener el área lateral total de la mezcla se debe multiplicar el área lateral del filamento por cuatro debido al arreglo del molde del extruido y por dos ya que son dos boquillas de salidas de aire.

$$A = At \times\ 4 \times\ 2 = 0{,}00628\ m^2 \qquad [A\ X.20]$$

Cálculo del coeficiente de convección del aire:

$$h = \frac{m_{agua} \times cp_{agua} \times\ T_{eb} - T_{pared}\ + m_{agua} \times \lambda_{agua}}{A \times\ T_{media} - T_{\infty}} \qquad [A\ X.21]$$

$$h = \frac{0{,}086\ \frac{g}{s} \times 4{,}18 \frac{J}{g°C} \times\ 90{,}37 - 60\ °C + 0{,}086\ \frac{g}{s} \times 2281{,}27 \frac{J}{g}}{0{,}00628\ m^2 \times\ 40 - 20\ °C} \qquad [A\ X.22]$$

$$h = 1654{,}53\ \frac{W}{m^{2\circ}C} \qquad \text{[A X.23]}$$

Cálculo del número Nusselt

$$Nu_D = \frac{h \times D^*}{k} \qquad \text{[A X.24]}$$

$$D^* = longitud\ característica = \frac{4A_F}{Pm} \qquad \text{[A X.25]}$$

$$A_F = 2\ rectángulos\ de\ salida\ aire = 2 \times 0{,}1m \times 0{,}005m = 0{,}01m^2 \qquad \text{[A X.26]}$$

$$Pm = (2 \times \pi \times r_{tallarin} + l_{tallarin}) \times 2 \times 4 \qquad \text{[A X.27]}$$

$$Pm = \ 2 \times \pi \times 0{,}0025m + 0{,}05m\ \ \times 8 = 0{,}525m \qquad \text{[A X.28]}$$

$$D^* = \frac{4 \times 0{,}01m^2}{0{,}525\ m} = 0{,}0190\ m \qquad \text{[A X.29]}$$

$$Nu_D = \frac{1654{,}53\ \frac{W}{m^{2\circ}C} \times 0{,}0190\ m}{0{,}2574 \frac{W}{m^{\circ}C}} \qquad \text{[A X.30]}$$

$$Nu_D = 122{,}28 \qquad \text{[A X.31]}$$

Cálculo del número de Reynolds

Se consideró la ecuación de Zhukauskas para el caso “Flujo alrededor o a través de un cilindro (Cilindro vertical en flujo cruzado)”. Todas las propiedades se determinaron a temperatura ambiente excepto Pr_s que se estimó a temperatura de pared. Los valores del número de Prandtl se tomaron de tablas de propiedades del aire a presión atmosférica (Incropera y DeWitt, 1999, p. 839).

$$Nu_D = C \times {Re_D}^m \times Pr^n \times \ \frac{Pr}{Pr_s}^{\ 1/4} \qquad \text{[A X.32]}$$

$$Re_D = \sqrt[1/m]{\frac{Nu_D}{C \times Pr^n \times \ \frac{Pr}{Pr_s}^{\ 1/4}}} \qquad \text{[A X.33]}$$

$$Re_D = \sqrt[1/0{,}7]{\frac{122{,}28}{0{,}076 \times 0{,}70882^{0{,}37} \times \ \frac{0{,}70882}{0{,}70238}^{\ 1/4}}} \qquad \text{[A X.34]}$$

$$Re_D = 45537{,}17 \qquad \text{[A X.35]}$$

Cálculo del caudal de aire

$$Re_D = \frac{Q_{aire} \times \rho_{aire} \times D^*}{A \times \mu} \quad \text{[A X.36]}$$

$$Q_{aire} = \frac{Re_D \times A \times \mu}{\rho_{aire} \times D^*} \quad \text{[A X.37]}$$

$$Q_{aire} = \frac{45537{,}17 \times 0{,}01 m^2 \times 1{,}81 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}}{1{,}194 \frac{kg}{m^3} \times 0{,}0190\ m} \quad \text{[A X.38]}$$

$$Q_{aire} = 0{,}363\ \frac{m^3}{s} = 1306{,}98 \frac{m^3}{h} = 21\ 782{,}99 \frac{l}{min} \quad \text{[A X.39]}$$

- Dimensionamiento de Equipos

Características del extrusor para la mezcla reciclada (ecuación de Rosato y Rosato)

$$m = 2{,}3 \times D^2 \times h_2 \times g \times N \quad \text{[A X.40]}$$

Donde:

m = alimentación (lb/h)
D = diámetro del husillo (pulgadas)
h_2 = altura del filete, zona dosificación (pulgadas)
g = gravedad específica del fundido
N = velocidad del husillo (rpm)

Tabla A X.2. Valores de prueba y error para la determinación del diámetro del husillo del extrusor

Diámetro del husillo (mm)	Diámetro del husillo (plg)	Revoluciones (rpm)
40	1,57	389,7
50	1,97	199,5
60	2,36	115,5
70	2,76	72,7

$$N = \frac{m}{2{,}3 \times D^2 \times h_2 \times g} \quad [A\ X.41]$$

$$h_2 = 0{,}05 \times D \quad [A\ X.42]$$

$$N = \frac{129{,}52}{2{,}3 \times 2{,}36^2 \times 0{,}118 \times 0{,}74} \quad [A\ X.43]$$

$$N = 115{,}5\ rpm \quad [A\ X.44]$$

Cálculo de la relación L/D

Tabla A X.3. Valores mínimos, medios y máximos de longitud por zona del husillo para la determinación de su longitud máxima

Zonas	**mínimo**	**medio**	**máximo**
Zona de alimentación (4D, 6D, 8D)	240	360	480
Zona de compresión (6D, 8D, 10 D)	360	480	600
Zona de dosificación (10D, 11D, 12D)	600	660	720
Longitud (mm)	1 200	1 500	1 800
L/D	20	25	30

Se consideró para el cálculo de L/D el valor máximo de la longitud del husillo y el diámetro de 60 mm.

$$\frac{L}{D} = \frac{1800\ mm}{60\ mm} = 30 \quad [A\ X.45]$$

Cálculo de la relación de compresión Rc

Tabla A X.4. Valores mínimos, medios y máximos de longitud por zona del husillo para la determinación de su longitud máxima

Alturas de los filetes	**mínimo**	**máximo**
Zona de Alimentación (0,10D a 0,15D)	6	9
Zona de Dosificación (0,025D a 0,050D)	1,5	3

Se consideró para el cálculo de Rc los valores máximos de las alturas de los filetes

$$Rc = \frac{h_1}{h_2} \quad [A\ X.46]$$

Donde:

h_1 = altura del filete, zona de alimentación (mm)
h_2 = altura del filete, zona dosificación (mm)

$$Rc = \frac{9}{3} = 3 \qquad \text{[A X.47]}$$

Cálculo de la potencia mínima de extrusión

$$Potencia = 0{,}00053 \times m \times cp \times (T_e \times T_s) \qquad \text{[A X.48]}$$

Donde:

m = alimentación (lb/h)
cp = capacidad calorífica (btu/lb°F)
T_e= Temperatura de entrada (°F)
T_S= Temperatura de salida (°F)

$$Potencia = 0{,}00053 \times 129{,}52 \times 0{,}54 \times (410 - 68) \qquad \text{[A X.49]}$$

$$Potencia = 12{,}57\ hp = 9{,}37kW \qquad \text{[A X.50]}$$

- Características del extrusor para la mezcla comercial:

Cálculo de la densidad del fundido de la mezcla comercial:

$$\rho_{Mfundida} = 0{,}05 \times \rho_{PP\ fundido} + 0{,}95 \times \rho_{PEAD\ fundido} \qquad \text{[A X.51]}$$

$$\rho_{Mfundida} = 0{,}05 \times 0{,}7348 \frac{g}{cm^3} + 0{,}95 \times 0{,}7535 \frac{g}{cm^3} \qquad \text{[A X.52]}$$

$$\rho_{Mfundida} = 0{,}7525 \frac{g}{cm^3} \qquad \text{[A X.53]}$$

$$g_{Mfundida} = \frac{0{,}7525 \frac{g}{cm^3}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 0{,}7525 \qquad \text{[A X.54]}$$

Cálculo del número de revoluciones (ecuación de Rsato y Rosato):

$$m = 2{,}3 \times D^2 \times h_2 \times g \times N \qquad \text{[A X.55]}$$

Donde:

m = alimentación (lb/h)
D = diámetro del husillo (pulgadas)
h_2 = altura del filete, zona dosificación (pulgadas)
g = gravedad específica del fundido
N = velocidad del husillo (rpm)

De igual manera que para el caso anterior, se realizó el método de prueba y error con 60 mm de diámetro.

$$N = \frac{m}{2{,}3 \times D^2 \times h_2 \times g} \qquad \text{[A X.56]}$$

$$h_2 = 0{,}05 \times D \qquad \text{[A X.57]}$$

$$N = \frac{129{,}52}{2{,}3 \times 2{,}36^2 \times 0{,}118 \times 0{,}7525} \qquad \text{[A X.58]}$$

$$N = 113{,}5\, rpm \qquad \text{[A X.59]}$$

Cálculo de la potencia mínima de extrusión

$$Potencia = 0{,}00053 \times m \times cp \times (T_e \times T_s) \qquad \text{[A X.60]}$$

Donde:

m = alimentación (lb/h)
cp = capacidad calorífica (btu/lb°F)
T_e= Temperatura de entrada (°F)
T_S= Temperatura de salida (°F)

$$Potencia = 0{,}00053 \times 129{,}52 \times 0{,}54 \times (428 - 68) \quad \text{[A X.61]}$$

$$Potencia = 13{,}24\ hp = 9{,}87 kW \quad \text{[A X.62]}$$

Los valores de Rc y L/D no varían.

ANEXO XI

HOJAS DE ESPECIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS SELECCIONADOS PARA LA PLANTA DE MEZCLADO

Se presentan a continuación las hojas técnicas de los equipos utilizados en el diseño de la planta para mezclado de poliolefinas comerciales y recicladas.

Tabla A XI.1. Hoja de especificación del dosificador de tornillo

Hoja de especificación 1			
Nombre del equipo	Dosificador de tornillo		
Identificación	Nomenclatura: L-101 y L-102		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 2		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	2 133
		Ancho (mm)	200
		Altura (mm)	2 196
	Capacidad (kg/h)	70	
	Potencia (kW)	2,2	
Material de fabricación	Acero inoxidable grado 321		

Tabla A XI.2. Hoja de especificación del extrusor monohusillo

Hoja de especificación 2			
Nombre del equipo	Extrusor monohusillo		
Identificación	Nomenclatura: X-101		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	2 650
		Ancho (mm)	600
		Altura (mm)	1 700
	Capacidad (kg/h)	60-100	
	Potencia (kW)	55	
	Diámetro husillo (mm)	70	
	Relación L/D	30	
	Velocidad máxima husillo (rpm)	150	
	Zonas de calentamiento	5	
	Potencia de calentamiento (kW)	25	
Material de fabricación	Husillo	38CrMoAlA	

Tabla A XI.3. Hoja de especificación de la bandeja de enfriamiento

Hoja de especificación 3			
Nombre del equipo	Bandeja para agua refrigerada		
Identificación	Nomenclatura: V-101		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	3 000
		Ancho (mm)	350
		Altura (mm)	700
Material de fabricación	Acero inoxidable grado 321		

Tabla A XI.4. Hoja de especificación del enfriador Chiller

Hoja de especificación 4			
Nombre del equipo	Enfriador Chiller		
Identificación	Nomenclatura: E-101		
	Fabricante: HAITIAN Plastics Machiney		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	1 100
		Ancho (mm)	600
		Altura (mm)	900
	Capacidad (l/min)	15,1	
	Potencia (kW)	5,3	
	Capacidad del reservorio (l)	37,9	
	Temperatura máxima de entrada (°C)	35	
	Temperatura máxima de salida (°C)	5	
	Refrigerante	R-410A	
Material de fabricación	Acero inoxidable		

Tabla A XI.5. Hoja de especificación del soplador de aire

Hoja de especificación 5			
Nombre del equipo	Soplador de aire		
Identificación	Nomenclatura: B-101		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	460
		Ancho (mm)	365
		Altura (mm)	1 100
	Frecuencia (Hz)	60	
	Flujo de aire (l/min)	24 000	
	Potencia (kW)	2,2	
Material de fabricación	Acero al carbono		

Tabla A XI.6. Hoja de especificación de la pelletizadora de cuchillas

Hoja de especificación 6			
Nombre del equipo	Pelletizadora de cuchillas		
Identificación	Nomenclatura: M-101		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	500
		Ancho (mm)	600
		Altura (mm)	1 300
	Potencia (kW)	3	
	Capacidad (kg/h)	80	
Material de fabricación	Aleación de acero endurecido		

Tabla A XI.7. Hoja de especificación del vibrador

Hoja de especificación 7			
Nombre del equipo	Vibrador		
Identificación	Nomenclatura: -		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	1 050
		Ancho (mm)	450
		Altura (mm)	500
	Potencia (kW)	0,2	
Material de fabricación	Acero inoxidable		

Tabla A XI.8. Hoja de especificación de la máquina de llenado

Hoja de especificación 8			
Nombre del equipo	Máquina de llenado		
Identificación	Nomenclatura: FB-101		
	Fabricante: PLASTEC U.S.A.		
	Número de equipos: 1		
Especificaciones del equipo	Dimensiones	Largo (mm)	1 000
		Ancho (mm)	1 000
		Altura (mm)	2 100
	Llenado (sacos/h)	6	
	Potencia (kW)	2,2	
Material de fabricación	Acero al carbono		

ANEXO XII

PROFORMAS DE LA LÍNEA DE EXTRUSIÓN

En este Anexo se muestran las proformas de la línea de extrusión para la planta de mezclado de polioelfinas.

PLASTEC U.S.A.

Escuela Politecnica Nacional
Quito, Ecuador,
Att: Ing. Francisco Quiroz

Quote: Q130343QE-CJ

Regrind Flake Strand Pelletizing Line

(Capacity: 60-100 kg/hr)

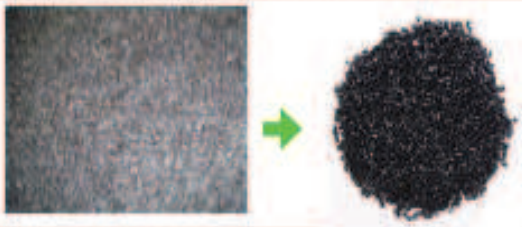
(The picture is only for reference)

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A.

Thank you very much for your inquiry. We are pleased to offer you the following based on our enclosed general terms and conditions of delivery and sale.

1. Project evaluation: A strand pelletizing system from various regrind flake materials.

1.1. General information:

Raw material & formulation	Regrind flake
Final product & Melt capacity	Pellets at 60-100 kg/h
Central height:	~1m
Operation direction	From right to left (face to the operator panel)
Machine color	Standard color: RAL7016 (Anthracite grey); RAL9002 (Grey white)
Picture/Diagram of the final product	

1.2 Work conditions at the site location:
Provided by the customer.

Warehouse/Workshop	Construction of foundations and construction works. The supply of cranes, fork-lifts or other lifting equipment. Mounting materials and tools. Dimension: 13.1m (length) ×2.7m (width) ×2.2m (height)
Temperature & Humidity	≤40℃ at the facility location.
Power supply	460 v, 3ph, 60 hz.
Wire/cables/ water hose:	Wires/cables from the power supply to the control cabinet of this production line. All electrical cables from the control cabinet to each machine. Water hoses: Supply water to the machines and reservoirs.

Page 2 of 8

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

Lubrication oil:	Exxon mobile
Compressor	Supply compressed air
Ancillary staff	1 Person

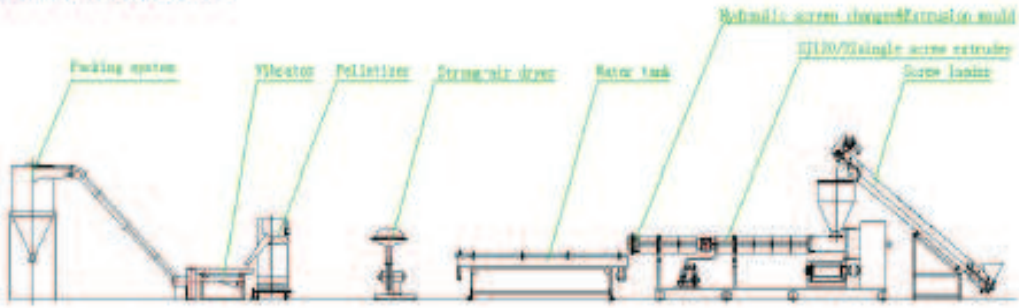
1.3 Energy consumption

Installation power	64.8 KW
Vacuum	-0.095MPa

1.4 Commercial terms

Project	Strand Pelletizing Line from various regrind flake materials.
Price in USD List Price	**USD $125.800.00 Puesto en su Planta**
Payment terms	50% down payment by wire transfer 50% by wire transfer before delivery and after inspection
Delivery	60 days from the date of receiving the down payment
Packaging	Wood pallet covered by plastic film
Warranty period	13 months from the date of the bill of lading

1.5 Flow schematic :



Page 3 of 8

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

1.6 Machinery list and price:

TOTAL PUESTO EN SU PLANTA	$125.800.00

Remarks:

Manufacturer Machinery will set-up the complete extrusion line for testing, before shipment to the customer. All costs relating to the test materials and compounds are the responsibility of the customer.

Page 4 of 8

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

2.1 Technical data			
Item	**Machine**	**Photo of the equipment**	**Technical specifications**
1	**Screw loader**		***Flake feeding***
		Motor power: 2.2KW Material contact: Stainless steel 321	
2	**SJ75/33 single screw extruder**	ABB frequency inverter control 	***Screw:*** ***Barrel:*** ***Drive motor:*** ***Venting system:*** ***Electrical cabinet:*** ***Self protection system:***
		Screw: Screw diameter: 70mm, L/D: 30/1 Screw material: 38CrMoAlA Surface treatment: Nitride thickness: 0.4~0.7 mm, polished Maximum screw speed: 150 rpm **Barrel:** Inner processing: Nitride thickness : 0.4 ~ 0.7mm Heating zones: 5 zones. Heating power: 25 KW Heater: Cast Aluminum with stainless steel covering Cooling air fans: 0.37KW x 5 sets **Drive motor:** Motor power: 55 KW, AC motor **Venting system:** Vacuum pump: 2.2 KW x 1set **Electrical cabinet :** Speed regulators: ABB inverter Contactors: Schneider	

Page 5 of 8

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

		Air Switches: Schneider Relays: Omron Temperature controllers: RKC or Omron **Self protection system:** Over current protection of the motor Over pressure protection of the screw	
3	**Hydraulic screen changer**		***Polymer filtering***
		The screen changer has melt pressure and temperature transducers Dual station Maximum pressure: 20MPa Decompression valve. Heating power: 5KW	
4	**Water tank**		***Strand cooling***
		Tank length: 3000mm Material contact: Stainless steel 321	
5	**Strong-air dryer**		***Strand drying***
		Motor power:2.2KW	

Page 6 of 8

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

6	Pelletizer		*Strand cutting*
		Motor power:3KW Speed controlled by ABB or HITACHI frequency inverter Material of the rotary blades: high-quality hardened alloy steel	
7	Vibrator		*Pellet screening*
		Motor power: 0.2KW Pellet Contact: Stainless steel	
8	Packing system		*Final product Packaging*
		Loading blower: Motor power: 2.2KW Contact material: Stainless steel **Silo:** Contact material: Stainless steel Silo frame: carbon steel Volume of silo: $1m^3$	

2.2 Spare Parts Included

No.	Name	Qty.	Application
1	Screw dismantling tool	1 set	Screw dismantle
2	Pelletizer cutting blade	1set	Cutter
3	Pressure sensor	1pc	Die
4	Thermocouples	2pcs	Barrel

Page 7 of 8

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

PLASTEC U.S.A.

5	Oil seal for gearbox frame	1pc	Gearbox
6	Low voltage circuit-breaker & small AC contactor	One for each	Electrical cabinet

3. After-sales service

3.1 Technical documents

All labels on machines and lay-out drawings, electrical diagrams and user manuals, will be in English.

3.2. Arrangement for inspection, installation and testing

a. After all the ordered equipment has been delivered to the customer's factory; the Buyer is responsible for all preparation work, e.g. electrical supply, water supply, labor and cranes, etc.

b. MANUFACTURER will prepare visa applications for their engineers, who are responsible for the supervision of the machine installation and testing at the Buyer's factory.

c. The Buyer will buy a round-trip air ticket for the engineers, if the visa application is approved. The buyer is also responsible to bear expenses generated, e.g. visa formalities, meals, accommodation and an allowance of USD125.00 per day for each engineer.

d. Engineers will give free training to personnel in the buyer's factory.

e. If the buyer does not request installation and commissioning by the Seller's engineers within four months from the date of the bill of lading, it will be taken that all the supplied equipment has been successfully tested by the buyer.

3.3. Quantity and quality guarantee

a. Quantity/Quality Discrepancy to destination port during transportation:

In case of quality/quantity discrepancies to the destination port the customer should file claims within 30 days from the arrival of the goods at their destination. The insurance company and the shipping company will be responsible for any discrepancies or product damage caused by the shipping company or other transportation organizations.

b. Guarantee period and after-sales services: 13 months from the date of the bill of lading.

During this guarantee period, MANUFACTURER will provide spare parts at no charge in cases of quality discrepancy caused by us. If the malfunctions are caused by incorrect operation of the equipment, MANUFACTURER will provide the buyer spare parts at cost price.

c. Long-term service:

MANUFACTURER will charge the buyer cost price of spare parts beyond one year and provide long-term technical guidance.

3.4. Validity: Three months from the quotation date.

Kind Regards,

Hector M. Acosta
Plastec USA, Inc.

Figura A XII.1. Proforma de la línea de extrusión de la Casa Comercial Plastec S.A. **(continuación…)**

HAITIAN
PLASTICS MACHINERY

NINGBO HAITIAN HUAYUAN MACHINERY CO.,LTD.

Export Processing Zone, Ningbo, China Zip Code: 315800
Tel: +86-574-86177242 Fax: +86-574-86221864

Nº. 005-20130130EP

Quito, 30 enero de 2013

INGENIERO
FRANCISCO QUIROZ

Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente, cotizo los equipos periféricos solicitados, los mismos que los pueden ser despachados inmediatamente.

Modelo	Capacidad	Descripción shillers marca YANN BANG (TAIWAN)	Sub total	Iva	Precio unitario puesto en Ecuador, Incl Iva
YBA-100-D001	10 HP	Shiller enfriado por aire (gas ecologico)	$ 12.835,89	$ 1.540,31	$ 14.376,20
YBA-150-D001	15 HP	Shiller enfriado por aire (gas ecologico)	$ 15.572,79	$ 1.868,73	$ 17.441,53
TOTAL			$ 28.408,69	$ 3.409,04	$ 31.817,73

FORMA DE PAGO: A acordar.

GARANTÍA: Un año, por defectos de fabricación.

Por la atención que se digne otorgar a la presente, anticipo mis agradecimientos.

Galo Villagómez Holguin
REPRESENTANTE DE VENTAS PARA EL ECUADOR
HAITIAN PLASTICS MACHINERY
0999-905915
022-042014/022-042023/022-042022
www.haitian.com

Figura A XII.2. Proforma del enfriador Chiller de la Casa Comercial HAITIAN Plastics Machinery

ANEXO XIII

CÁLCULOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR

Se consideró como ejemplo de cálculo a la mezcla con poliolefinas recicladas

- Producción mensual (sacos de 25 kg)

Se toma en cuenta que se trabajará 8 horas diarias de lunes a viernes

$$58{,}75\ \frac{kg}{h} \times 8h \times 5días \times 4semanas = 9400\frac{kg}{mes} \times \frac{1\ saco}{25\ kg} = 376\ \frac{sacos}{mes} \quad \text{[A XIII.1]}$$

- Costo de materia prima reciclada por mes

El costo del PEAD y PP reciclados es de $1\frac{\$}{kg_{PEAD}}$ y $1\frac{\$}{kg_{PP}}$.

$$58{,}75\ \frac{kg\ mezcla}{h} \times 8h \times 5días \times 4semanas = 9400\frac{kg}{mes} \times 1\frac{\$}{kg} = 9400\frac{\$}{mes} \quad \text{[A XIII.2]}$$

- Costo unitario de materia prima (por saco producido)

$$9400\frac{\$}{mes} \times \frac{1\ mes}{376\ sacos} = 25\ \frac{\$}{saco} \quad \text{[A XIII.3]}$$

- Costo de agua de enfriamiento por mes

Para enfriar la mezcla reciclada se requiere 189,11 kg/h de agua. Este insumo se recircula mediante un sistema Chiller por lo que repondrá esta cantidad 8 veces por mes.

$$0{,}189\ m^3 \times \frac{8\ veces}{mes} = 1{,}52\ \frac{m^3}{mes} \times 0{,}72\ \frac{\$}{m^3} = 1{,}08\frac{\$}{mes} \quad \text{[A XIII.4]}$$

El valor de \$ 0.72/m^3 corresponde al costo de consumo industrial de agua en Quito.

Se cobra 36,6% del consumo mensual por alcantarillado:

$$1{,}08\frac{\$}{mes} \times 0{,}366 = 0{,}40\frac{\$}{mes} \qquad \text{[A XIII.5]}$$

Tarifa total mensual incluido el cargo fijo de conexión que es de $ 2,10/mes

$$1{,}08\frac{\$}{mes} + 0{,}40\frac{\$}{mes} + 2{,}10\frac{\$}{mes} = 3{,}58\ \frac{\$}{mes} \qquad \text{[A XIII.6]}$$

Costo unitario de agua de enfriamiento (por saco producido):

$$3{,}58\ \frac{\$}{mes} \times \frac{1\ mes}{376\ sacos} = 0{,}01\ \frac{\$}{saco} \qquad \text{[A XIII.7]}$$

- Costo de energía eléctrica por mes

El valor total de potencia consumida por los equipos de la planta es de 70,1 kW. el costo de kWh para consumo industrial es de $ 0,068.

$$70{,}1\ kW \times 8h \times 5días \times 4semanas = 11\ 216\frac{kWh}{mes} \times 0{,}068\ \frac{\$}{kWh} = 762{,}69\frac{\$}{mes}$$

[A XIII.8]

Recargo por zona industrial de $ 4,182 por kW mes

$$70{,}1\ kW \times 4{,}182\frac{\$}{kW \times mes} = 293{,}16\ \frac{\$}{mes} \qquad \text{[A XIII.9]}$$

5 % Alumbrado Público del consumo para industrias

$$762{,}69\frac{\$}{mes} \times 0{,}05 = 38{,}13\ \frac{\$}{mes} \qquad \text{[A XIII.10]}$$

10 % Tasa de recolección de basura

$$762{,}69\frac{\$}{mes} \times 0{,}1 = 76{,}27\ \frac{\$}{mes} \qquad \text{[A XIII.11]}$$

Se recarga también $ 1,414 por comercialización y $ 17,52 por contribución al Cuerpo de Bomberos

Costo mensual de energía eléctrica:

$$762{,}69\frac{\$}{mes} + 293{,}16\ \frac{\$}{mes} + 38{,}13\ \frac{\$}{mes} + 76{,}27\ \frac{\$}{mes} + 1{,}414\ \frac{\$}{mes} + 17{,}52\frac{\$}{mes} = 1189{,}18\frac{\$}{mes} \qquad \text{[A XIII.12]}$$

Costo unitario de energía eléctrica (por saco producido):

$$1189{,}18\ \frac{\$}{mes} \times \frac{1\ mes}{376\ sacos} = 3{,}16\ \frac{\$}{saco} \qquad \text{[A XIII.13]}$$

- Salario anual de operarios de planta

Salario para 1 operario:

$$318\frac{\$}{mes} \times 12 = 3\ 816\frac{\$}{anual} \qquad \text{[A XIII.14]}$$

11,15 % Aporte patronal al IESS:

$$318\frac{\$}{mes} \times 0{,}1115 = 35{,}46\frac{\$}{mes} \times 12 = 425{,}48\frac{\$}{anual} \qquad \text{[A XIII.15]}$$

Décimo tercer sueldo anual:

$$\frac{3816\frac{\$}{anual}}{12} = 318\frac{\$}{anual} \qquad \text{[A XIII.16]}$$

Décimo cuarto sueldo: equivale a un sueldo mínimo: $318\frac{\$}{anual}$

Salario total mensual

$$3816\frac{\$}{anual} + 425{,}48\frac{\$}{anual} + 318\frac{\$}{anual} + 318\frac{\$}{anual} = \frac{4877{,}48\,\frac{\$}{anual}}{12} = 406{,}46\ \frac{\$}{mes}$$

$$406{,}46\ \frac{\$}{mes} \times 3\ operarios = 1\ 219{,}37\frac{\$}{mes}$$

[A XIII.17]

Salario Unitario (por saco producido)

$$1219{,}37\frac{\$}{mes} \times \frac{1\ mes}{376\ sacos} = 3{,}24\ \frac{\$}{saco}$$ [A XIII.18]

- Costo de producción por saco de mezcla:

$$C.U._{materia\ prima} + C.U._{insumos} + Salario_{3\ operarios} + C.U._{saco\ de\ yute} = Costo\ de\ Producción$$

[A XIII.19]

$$25\ \frac{\$}{saco} + (0{,}01\ \frac{\$}{saco} + 3{,}16\ \frac{\$}{saco}) + 3{,}24\ \frac{\$}{saco} + 0{,}20\frac{\$}{saco} = 31{,}61\frac{\$}{saco}$$ [A XIII.20]