

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE MEZCLADO DE
POLIAMIDAS Y POLIÉSTERES COMERCIALES Y RECICLADOS A
ESCALA PILOTO**

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

GABRIELA DAYANA MIJAS VÉLEZ

gdmv87@gmail.com

DIRECTOR: ING. FRANCISCO QUIROZ

Francisco.quiroz@epn.edu.ec

Quito, octubre 2013

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

DECLARACIÓN

Yo, Gabriela Dayana Mijas Vélez, 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.

Gabriela Dayana Mijas Vélez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Gabriela Dayana Mijas Vélez, bajo mi supervisión.

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 Ciencia de Alimentos y Biotecnología.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su paciencia, amor y ejemplo, por enseñarme que las metas se cumplen si uno se las propone.

A mi padre por sus consejos, apoyo y amor.

A toda mi familia por estar pendientes de mí siempre.

A Eli y a Mayrita, por su amistad incondicional.

A Miguicho, por su apoyo en esta última etapa de nuestra carrera.

A Javi, por hacerme ver la vida de otra manera.

A todo el CIAP por hacerme sentir parte de una gran familia: a Ivancito y a Liz, por su amabilidad, al Ing. Miguel Aldás por su gran amistad, al Ing. Francisco Quiroz por sus consejos, apoyo y acertada dirección en este trabajo.

Al Dr. Francisco Cadena, Ing. Omar Bonilla y a la Ing. Hilda Trujillo por ser más que unos profes, unos amigos.

Al Ing. Vladimir Valle, por toda su ayuda desde la distancia.

Gracias a todas aquellas personas que conocí a lo largo de mi vida estudiantil y me permitieron aprender algo nuevo todos los días.

A mis compañeros de la facultad: Lore, Xime, Luchito, Chula, Jessy, Kary, Paco, Andrés, Karlita, Estefanía.... Por compartir tantos momentos que quedarán grabados en mi mente y en mi corazón.... Esta aventura recién empieza.....

DEDICATORIA

*A mi querida hermana Katerine...aunque somos muy diferentes, en el fondo somos iguales.
Te quiero mucho :-)*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

		PÁGINA
RESUMEN		xxi
INTRODUCCIÓN		xxiii
1	PARTE TEÓRICA	1
1.1	Mezclas de poliésteres y poliamidas	1
1.1.1	Generalidades	1
1.1.2	Poliésteres Termoplásticos: poli (etilen tereftalato) (PET) y poli (butilen tereftalato) (PBT)	3
1.1.2.1	Nomenclatura y obtención	3
1.1.2.2	Estructura y morfología	5
1.1.2.3	Propiedades	7
1.1.2.4	Degradación	9
1.1.2.5	Aplicaciones	10
1.1.3	Poliamida 6 (PA6)	10
1.1.3.1	Nomenclatura y obtención	10
1.1.3.2	Estructura y morfología	13
1.1.3.3	Propiedades	15
1.1.3.4	Aplicaciones	16
1.1.4	Mezclas	17
1.1.4.1	Tipos de mezclas	17
1.1.4.2	Mezclado dispersivo y distributivo	19
1.1.4.3	Equipos de mezclado	21
1.1.4.4	Mezclas de poliésteres	26
1.1.4.5	Mezclas de poliamidas	29
1.1.4.6	Mezclas de poliésteres y poliamidas	32
1.2	Métodos de análisis de mezclas de polímeros	35
1.2.1	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	35
1.2.1.1	Transiciones térmicas en polímeros y sus mezclas	36
1.2.1.2	Factores que afectan en la medición de las transiciones térmicas	41
1.2.1.3	Número de barridos	43
1.2.1.4	Evaluación	44
1.2.2	Espectroscopía de infrarrojo (FTIR)	46
1.2.2.1	Generalidades	46
1.2.2.2	Principales técnicas de FTIR	47
1.3	Reciclaje de poliésteres y poliamidas	48
1.3.1	Reciclaje de poliésteres	48
1.3.1.1	Introducción	48
1.3.1.2	Contaminantes presentes en el proceso de reciclaje del PET	48

1.3.1.3	Procesos de reciclaje convencionales del PET	50
1.3.1.4	Aumento de la viscosidad intrínseca de PET reciclado	51
1.3.2	Reciclaje de poliamidas	52
2	PARTE EXPERIMENTAL	54
2.1	Caracterización de los materiales puros	54
2.1.1	Análisis por espectroscopía de infrarrojo (FTIR)	55
2.1.1.1	Preparación de las muestras	55
2.1.1.2	Obtención y análisis de espectros	56
2.1.2	Determinación de densidad	56
2.1.3	Determinación del contenido de cenizas	57
2.1.4	Determinación de las propiedades térmicas	58
2.1.4.1	Limpieza del horno de los calorímetros	58
2.1.4.2	Calibración	60
2.1.4.3	Validación	60
2.1.4.4	Barridos	60
2.1.4.5	Obtención de las transiciones térmicas	62
2.2	Evaluación de la miscibilidad de las mezclas de poliésteres y poliamidas	62
2.2.1	Preparación de mezclas binarias	62
2.2.1.1	Identificación de las mezclas a prepararse	62
2.2.1.2	Secado	63
2.2.1.3	Mezclado	64
2.2.2	Evaluación de las transiciones térmicas	65
2.2.3	Evaluación del mezclado dispersivo y distributivo	66
2.3	Aplicación de las condiciones definidas para la mezcla de poliésteres y poliamidas comerciales a materiales reciclados	68
2.3.1	Consideraciones previas	68
2.3.2	Caracterización de materiales reciclados	68
2.3.3	Preparación de la mezcla binaria con materiales reciclados	70
2.3.3.1	Secado	70
2.3.3.2	Mezclado	70
2.3.4	Evaluación de las transiciones térmicas	70
2.3.5	Evaluación del mezclado dispersivo y distributivo	70
2.4	Diseño de la planta piloto de mezclado con materiales en estudio reciclados	71
2.4.1	Ingeniería conceptual	71
2.4.1.1	Capacidad y localización de la planta	71
2.4.2	Ingeniería básica	72
2.4.2.1	Descripción del alcance del diseño	72
2.4.2.2	Descripción detallada del proceso	72
2.4.2.3	Balance de masa	74
2.4.2.4	Criterios para la selección de equipos	75

2.4.2.5	Balance de energía	78
2.5	Evaluación económica preliminar de la planta piloto diseñada	78
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
3.1	Caracterización de materiales puros	79
3.1.1	Espectroscopía de infrarrojo	79
3.1.2	Determinación de la densidad	83
3.1.3	Determinación del contenido de cenizas	83
3.1.4	Determinación de las transiciones térmicas de los materiales puros	84
3.1.4.1	Validación de los calorímetros	84
3.1.4.2	Obtención de las transiciones térmicas	86
3.2	Evaluación de la miscibilidad de las mezclas de poliésteres y poliamidas	98
3.2.1	Preparación de mezclas binarias	98
3.2.2	Determinación de las transiciones térmicas de las mezclas	100
3.2.2.1	Sistema PETb / PBT	101
3.2.2.2	Sistema PA6 / PETe	113
3.2.3	Evaluación del mezclado dispersivo y distributivo	122
3.2.3.1	Probetas estándar	122
3.2.3.2	Probetas de mezclas	123
3.3	Aplicación de las condiciones definidas para la mezcla de poliésteres y poliamidas comerciales a materiales reciclados	125
3.3.1	Consideraciones previas	125
3.3.2	Caracterización de los materiales reciclados	127
3.3.2.1	Espectroscopía de infrarrojo	127
3.3.2.2	Determinación de la densidad	128
3.3.2.3	Determinación del contenido de cenizas	129
3.3.2.4	Determinación de las transiciones térmicas de los materiales reciclados	130
3.3.3	Preparación de la mezcla binaria con materiales reciclados	137
3.3.4	Determinación de las transiciones térmicas de la mezcla con materiales reciclados	138
3.3.5	Evaluación del mezclado dispersivo y distributivo	142
3.4	Diseño de la planta piloto de mezclado con materiales en estudio reciclados	143
3.4.1	Ingeniería conceptual	143
3.4.1.1	Definición del producto	143
3.4.1.2	Campo de aplicación	143
3.4.1.3	Disponibilidad de materia prima	143
3.4.1.4	Capacidad y Localización de la planta	144
3.4.2	Ingeniería básica	145
3.4.2.1	Diagramas BFD y PFD	145
3.4.2.2	Equipos seleccionados para el proceso	148

3.4.2.3	Plano de distribución en planta (Lay out) y plano de elevación	148
3.4.2.4	Consumo energético de la planta piloto	151
3.5	Evaluación económica preliminar de la planta piloto diseñada	151
3.5.1	Inversión fija	151
3.5.2	Estimación del costo de producción por unidad	152
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
4.1	Conclusiones	154
4.2	Recomendaciones	156
	BIBLIOGRAFÍA	157
	ANEXOS	169

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Propiedades mecánicas de PET y PBT	8
Tabla 1.2.	Principales aplicaciones de PET y PBT	12
Tabla 1.3.	Propiedades mecánicas de PA-6	15
Tabla 1.4.	Principales aplicaciones de PA-6	16
Tabla 1.5.	Ventajas y desventajas de los mezcladores internos por cargas	24
Tabla 1.6.	Tipos de rotores y sus aplicaciones	25
Tabla 1.7.	Mezclas de poliésteres termoplásticos	30
Tabla 1.8.	Algunas mezclas entre poliésteres y poliamidas	34
Tabla 1.9.	Requerimientos mínimos para el reprocesamiento de PET reciclado	49
Tabla 2.1.	Materiales puros utilizados en el estudio	54
Tabla 2.2.	Condiciones de operación de la prensa para la obtención de láminas delgadas	56
Tabla 2.3.	Composición de las mezclas binarias de los sistemas analizados	63
Tabla 2.4.	Condiciones de operación del reómetro Haake Rheomix para la obtención de mezclas binarias de poliésteres y poliamidas	64
Tabla 2.5.	Condiciones de operación de la prensa para la obtención de probetas por moldeo a compresión	66
Tabla 2.6.	Materiales reciclados utilizados en el estudio	68
Tabla 3.1.	Análisis de grupos funcionales presentes en los espectros de PET y PBT	81
Tabla 3.2.	Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de PA6	83
Tabla 3.3.	Valores de densidad obtenidos para cada material en	83

	estudio	
Tabla 3.4.	Porcentaje de inorgánicos presentes en cada material en estudio	84
Tabla 3.5.	Comparación entre la temperatura onset de fusión y la entalpía teórica y calculada después de la calibración del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix	85
Tabla 3.6.	Comparación entre la temperatura onset de fusión y la entalpía teórica y calculada después de la calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50	85
Tabla 3.7.	Valores experimentales y bibliográficos de temperatura de cristalización de los materiales puros	90
Tabla 3.8.	Valores experimentales y bibliográficos de temperatura de transición vítrea de los materiales puros	93
Tabla 3.9.	Resultados experimentales obtenidos de la determinación de las transiciones térmicas de los materiales puros	97
Tabla 3.10.	Comparación entre la temperatura de transición vítrea teórica y experimental de las mezclas 95 % PETb, 90 % PETb y 80 % PETb	107
Tabla 3.11.	Calores de fusión de las mezclas del sistema PETb – PBT	112
Tabla 3.12.	Valores cuantitativos de la distribución y dispersión de las probetas estándar	122
Tabla 3.13.	Propiedades térmicas de las mezclas 95 % PETb, 90% PETb y 80 % PETb	126
Tabla 3.14	Valores de densidad obtenidos para los materiales puros y reciclados	129
Tabla 3.15	Porcentaje de inorgánicos presentes en los materiales puros y reciclados	129
Tabla 3.16.	Equipos seleccionados para la planta piloto	148
Tabla 3.17.	Consumo energético de los equipos de la planta piloto diseñada	151
Tabla 3.18.	Inversiones fijas para la planta piloto diseñada	152
Tabla 3.19.	Salario de los trabajadores de la planta piloto	152

Tabla 3.20.	Costos por unidad de producción de la planta piloto	153
Tabla AII.1.	Valores obtenidos para el cálculo de la densidad de los materiales puros	174
Tabla AII.2.	Valores obtenidos para el cálculo de la densidad de los materiales reciclados	174
Tabla AIII.1.	Valores obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos de PETB y PETe	176
Tabla AIII.2.	Valores obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos de PBT y PA6	176
Tabla AIII.3.	Valores obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos de PETbr y PBTr	177
Tabla AIV.1.	Estándares utilizados para la calibración del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix	178
Tabla AIV.2.	Barridos realizados para los estándares de calibración del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix	179
Tabla AIV.3.	Temperatura onset de fusión de los estándares de calibración	180
Tabla AIV.4.	Diferencia entre la temperatura de referencia (Temp. nom.) y la temperatura corregida (Temp. corr.) para cada estándar	181
Tabla AIV.5.	Áreas de los picos de fusión de los estándares de calibración	182
Tabla AIV.6.	Diferencia entre la Sensitividad calculada (Sensit. Calc.) y la Sensitividad experimental (Sensit. Exp.) para cada estándar de calibración	183
Tabla AIV.7.	Estándares utilizados para la calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50	184
Tabla AIV.8.	Barridos realizados para los estándares de calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50	185
Tabla AIV.9.	Temperatura onset de fusión de los estándares de calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50	186
Tabla AIV.10.	Áreas de los picos de fusión de los estándares de calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50	187
Tabla AVII.1.	Pesos calculados de los componentes individuales de las	208

	mezclas del sistema PETb / PBT	
Tabla AVII.2.	Pesos calculados de los componentes individuales de las mezclas del sistema PA6 / PETe	209
Tabla AIX.1.	Perfil de Temperaturas de la extrusora a ser usado con materiales vírgenes	214
Tabla AIX.2.	Perfil de Temperaturas de la extrusora a ser usado con materiales reciclados	214

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Termoplásticos de ingeniería	1
Figura 1.2.	Producción mundial de plásticos por tipo en el año 2011	2
Figura 1.3.	Demanda mundial de termoplásticos por tipo en el año 2011	3
Figura 1.4.	Unidad constitucional repetitiva de PET y PBT	3
Figura 1.5.	Reacciones de polimerización de PET y PBT	4
Figura 1.6.	Estructuras cristalinas de PBT	6
Figura 1.7.	Estructura cristalina de PET	6
Figura 1.8.	Hidrólisis de poliéster	9
Figura 1.9.	Hidrólisis del PET en función de la temperatura	10
Figura 1.10.	Unidad constitucional repetitiva de PA6	11
Figura 1.11.	Reacciones principales durante la polimerización de la PA6	11
Figura 1.12.	Estructuras cristalinas del nylon 6	14
Figura 1.13.	Representación esquemática de la textura esferulítica de un polímero semicristalino	14
Figura 1.14.	Mezclado dispersivo y distributivo de un componente menor (rojo) en un componente mayor (verde)	20
Figura 1.15.	Elementos de una extrusora monohusillo convencional	21
Figura 1.16.	Zonas básicas de un husillo de extrusión	22
Figura 1.17.	Esquema de un mezclador interno por cargas	25
Figura 1.18.	Curva torque vs tiempo para un mezclador interno	26
Figura 1.19.	Angulo de dispersión de la luz en mezclas PBT/PET cristalizadas a 130 °C.	28
Figura 1.20.	Micrografías de mezclas PA/PA66 que contienen a) 0 %	31

	PA66, b) 6 % PA66, c) 10 % PA66, d) 10 % PA66 (preparada por extrusión)	
Figura 1.21.	Micrografías de extruidos con diferentes velocidades de cizallamiento	34
Figura 1.22.	Esquema de un termograma que muestra las transiciones térmicas encontradas en materiales poliméricos	35
Figura 1.23.	Evaluación de la temperatura de transición vítrea para el polimetil-metacrilato (PMMA)	37
Figura 1.24.	(a) Termogramas DSC de mezclas de poli (éter cetona éter cetona cetona) (PEKEKK) con diferentes cantidades de polietilenimina (PEI), (b) Temperatura de transición vítrea en función de la composición de la mezcla Poli (metil metacrilato) (PMMA) con poli (N-vinilcarbazol)	38
Figura 1.25.	Curva de fusión y distribución de espesor lamelar para un termoplástico semicristalino	38
Figura 1.26.	Curvas de calentamiento de a) HDPE, b) PET y c) mezcla 70/30 HDPE-PET	39
Figura 1.27.	Curva característica de cristalización	40
Figura 1.28.	Celda para ensayo DSC antes y después del encapsulamiento	42
Figura 1.29.	Diferentes formas de evaluar la transición vítrea	44
Figura 1.30.	Típica curva DSC y su primera derivada que muestra la Tg de un hidrolizado de almidón acuoso 20% (w/v)	45
Figura 1.31.	Dibujo esquemático de los diferentes tipos de línea base (lineal y curva) para la determinación del calor de fusión	45
Figura 1.32.	Espectro infrarrojo del n-butanal con sus respectivas vibraciones moleculares y bandas	47
Figura 1.33.	Esquema de reflectancia total	48
Figura 2.1.	Accesorio para determinación de densidades AG Mettler Toledo	57
Figura 2.2.	Calorímetros Diferenciales de Barrido utilizados para los ensayos: superior- Netzsch, inferior-Shimadzu	59
Figura 2.4.	Molde tipo flash utilizado para la elaboración de probetas	67

	por moldeo a compresión	
Figura 2.5.	Negatoscopio utilizado para la evaluación de la calidad de mezclado	67
Figura 2.6.	Materiales reciclados usados en la investigación	69
Figura 2.7.	Comparación del contenido de humedad final obtenido al utilizar un secador de aire seco y un deshumidificador	77
Figura 3.1.	Espectros infrarrojos de a) PETe y b) PETb superpuestos con estándar	79
Figura 3.2.	Espectros infrarrojos de a) PETe y b) PETb superpuestos con estándar	80
Figura 3.3.	Espectro infrarrojo de PBT	81
Figura 3.4.	Espectro infrarrojo de PA6	82
Figura 3.5.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PETb (gráfico superior) y PETe (gráfico inferior)	87
Figura 3.6.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PBT	89
Figura 3.7.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PA6	89
Figura 3.8.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PETb (gráfico superior) y PETe (gráfico inferior)	91
Figura 3.9.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PBT	92
Figura 3.10.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PA6	93
Figura 3.11.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PETb (gráfico superior) y PETe (gráfico inferior)	94
Figura 3.12.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PBT	96
Figura 3.13.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PA6	97

Figura 3.14.	Reogramas obtenidos de las mezclas del sistema PETb / PBT	99
Figura 3.15.	Reogramas obtenidos de las mezclas del sistema PA6 / PETe	100
Figura 3.16.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 95% PETb (a), 90 % PETb (b), 80 % PETb (c) y 50 % PETb (d)	103
Figura 3.17.	Termograma obtenido para la determinación de la temperatura de cristalización de la mezcla 20% PETb	104
Figura 3.18.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 95% PETb (a), 90 % PETb (b) y 80 % PETb (c)	105
Figura 3.19.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura transición vítrea de las mezclas 50% PETb (superior) y 20 % PETb (inferior)	106
Figura 3.20.	Temperatura de transición vítrea en función del porcentaje de PETb para el sistema PETb – PBT	107
Figura 3.21.	Comparación entre los datos experimentales y los obtenidos de la ecuación de Fox para la temperatura de transición vítrea del sistema PETb-PBT	108
Figura 3.22.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas 95 % PETb (a), 90 % PETb (b) y 80 % PETb (c)	110
Figura 3.23.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión las mezclas 50 % PETb (superior) y 80% PETb (inferior)	111
Figura 3.24	Temperatura de fusión de las mezclas PETb - PBT en función de la composición	112
Figura 3.25.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas (a) 90% PA6, (b) 80 % PA6, (c) 20 % PA6 y (d) 10 % PA6	115
Figura 3.26.	Variación de las temperaturas de cristalización en las mezclas del sistema PA6 / PETe	116
Figura 3.28.	Variación de las temperatura de transición vítrea en las mezclas del sistema PA6 / PETe	118

Figura 3.29.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas (a) 90% PA6, (b) 80 % PA6, (c) 20 % PA6 y (d) 10 % PA6	120
Figura 3.30.	Temperaturas de fusión del sistema PA6/PETe	121
Figura 3.31.	Calores de fusión del sistema PA6/PETE	121
Figura 3.32.	Probetas estándar de mezclado con mala distribución y mala dispersión (a), mala distribución y buena dispersión (b), buena distribución y mala dispersión (c), buena distribución y buena dispersión (c)	123
Figura 3.33.	Probetas obtenidas de la mezclas del sistema PETb-PBT: a) 95 % PETb, b) 90 % PETb-PBT, c) 80 % PETb, d) 50 % PETb, e) 20 % PETb	124
Figura 3.34.	Probetas obtenidas del sistema PA6 / PETe: a) 90 % PA6, b) 80 % PA6, c) 20 % PA6 y d) 10 % PA6	125
Figura 3.35.	Espectros infrarrojos de PETb comercial y reciclado	127
Figura 3.36.	Espectro infrarrojo de PBT comercial y reciclado	128
Figura 3.37.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PETb (gráfico superior) y PETbr (gráfico inferior)	131
Figura 3.38.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PBT (gráfico superior) y PBTr (gráfico inferior)	132
Figura 3.39.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PETb (gráfico superior) y PETbr (gráfico inferior)	133
Figura 3.40.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PBT (gráfico superior) y PBTr (gráfico inferior)	134
Figura 3.41.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PETb (gráfico superior) y PETbr (gráfico inferior)	135
Figura 3.42.	FTermogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PBT (gráfico superior) y PBTr (gráfico inferior)	136
Figura 3.43.	Reogramas obtenidos de las mezclas del 95 % PETb - 5 %	137

	PBT con materiales comerciales y reciclados	
Figura 3.44.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 95% PETb (superior) y 95 % PETbr (inferior)	139
Figura 3.45.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 95% PETb (superior) y 95 % PETbr (inferior)	140
Figura 3.46.	Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión las mezclas 95% PETb (superior) y 95 % PETbr (inferior)	141
Figura 3.47.	Probetas obtenidas de las mezclas 95 % PETb (izquierda) y 95 % PETbr (derecha)	142
Figura 3.48.	Ubicación de la planta piloto	145
Figura 3.49.	Diagrama de bloques del proceso (BFD) de obtención de 260 kg / día de la mezcla 95 % PET – 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados	146
Figura 3.50.	Diagrama de flujo del proceso (PFD) de obtención de 260 kg / día de la mezcla 95 % PET – 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados	147
Figura 3.51.	Plano de distribución (Lay out) de la planta piloto de mezclado de poliésteres comerciales y reciclados	149
Figura 3.52.	Plano de elevación de la planta piloto de mezclado de poliésteres comerciales y reciclados	49
Figura AI.1.	Hoja de especificación del poli (etilén tereftalato) grado inyección (PETb)	170
Figura AI.2.	Hoja de especificación del poli (etilén tereftalato) grado extrusión (PETe)	171
Figura AI.3.	Hoja de especificación del poli (butilén tereftalato) grado inyección (PBT)	172
Figura AI.4.	Hoja de especificación de la poliamida 6 (PA6)	173
Figura AIV.1.	Programa para calibración de la temperatura del calorímetro Netzsch	180
Figura AIV.4.	Curva de calibración de entalpía para el calorímetro Netzsch	183

Figura AIV.5.	Programa para calibración de temperatura del calorímetro Shimadzu DSC 50	186
Figura AIV.6.	Curva de calibración de entalpía para el del calorímetro Shimadzu DSC 50	188
Figura AIV.7.	Programa para calibración de entalpía del calorímetro Shimadzu DSC 50	188
Figura AV.1.	Termogramas del segundo y tercer barrido de Hg (calibración)	189
Figura AV.2.	Termogramas del segundo y tercer barrido de In (calibración)	190
Figura AV.3.	Termogramas del segundo y tercer barrido de Sn (calibración)	190
Figura AV.4.	Termogramas del segundo y tercer barrido de Bi (calibración)	191
Figura AV.5.	Termogramas obtenidos de la validación con Hg	191
Figura AV.6.	Termogramas obtenidos de la validación con In	192
Figura AV.7.	Termogramas obtenidos de la validación con Sn	192
Figura AVI.1.	Termograma del primer barrido de ácido benzoico	193
Figura AVI.2.	Termograma del segundo barrido de ácido benzoico	193
Figura AVI.3.	Termograma del tercer barrido de ácido benzoico	194
Figura AVI.4.	Termograma del primer barrido de In (calibración)	194
Figura AVI.5.	Termograma del segundo barrido de In (calibración)	195
Figura AVI.6.	Termograma del tercer barrido de In (calibración)	195
Figura AVI.7.	Termograma del primer barrido de Sn (calibración)	196
Figura AVI.8.	Termograma del segundo barrido de Sn (calibración)	196
Figura AVI.9.	Termograma del tercer barrido de Sn (calibración)	197
Figura AVI.10.	Termograma primer barrido de Bi (calibración)	197
Figura AVI.11.	Termograma del segundo barrido de Bi (calibración)	198

Figura AVI.12.	Termogramas del tercer barrido de Bi (calibración)	198
Figura AVI.13.	Termograma del primer barrido de Zn (calibración)	199
Figura AVI.14.	Termograma del segundo barrido de Zn (calibración)	199
Figura AVI.15.	Termograma del tercer barrido de Zn (calibración)	200
Figura AIV.16.	Termograma del primer barrido de ácido benzoico (validación)	200
Figura AVI.17.	Termograma del segundo barrido de ácido benzoico (validación)	201
Figura AVI.18.	Termograma del tercer barrido de ácido benzoico (validación)	201
Figura AVI.19.	Termograma del primer barrido de In (validación)	202
Figura AVI.20.	Termograma del segundo barrido de In (validación)	202
Figura AVI.21.	Termograma del tercer barrido de In (validación)	203
Figura AVI.22.	Termograma del primer barrido de Sn (validación)	203
Figura AVI.23.	Termograma del segundo barrido de Sn (validación)	204
Figura AVI.24.	Termograma del tercer barrido de Sn (validación)	204
Figura AVI.25.	Termograma del primer barrido de Bi (validación)	205
Figura AVI.26.	Termograma del segundo barrido de Bi (validación)	205
Figura AVI.27.	Termograma del tercer barrido de Bi (validación)	206
Figura AVI.28.	Termograma del primer barrido de Zn (validación)	206
Figura AVI.29.	Termograma del segundo barrido de Zn (validación)	207
Figura AVI.30.	Termograma del tercer barrido de Zn (validación)	207
Figura AIX.1.	Proporciones del silo de almacenamiento de sólidos según la norma API 650-1998	216
Figura AX.1.	Hoja de Especificación del premezclador	218
Figura AX.2.	Hoja de Especificación del deshumidificador	219

Figura AX.3.	Hoja de especificación de la tolva cristalizadora	220
Figura AX.4.	Hoja de especificación del silo de almacenamiento	221
Figura AX.5.	Hoja de especificación del silo de almacenamiento	222
Figura AX.6.	Hoja de especificación del baño de enfriamiento	223
Figura AX.7.	Hoja de especificación del pelletizador	224
Figura AX.8.	Hoja de especificación de la ensacadora	225
Figura AX.9.	Hoja de especificación de la bomba al vacío	226
Figura AX.10.	Hoja de especificación del sistema de alimentación	227
Figura AX.11.	Hoja de especificación de la báscula digital	228
Figura AXI.1.	Cotización de la línea completa de extrusión	229
Figura AXI.2.	Cotización de la báscula digital	234
Figura AXI.3.	Cotización de la báscula digital	235
Figura AXI.4.	Cotización del silo de almacenamiento	236
Figura AXI.5.	Cotización del PET virgen	237
Figura AXI.6.	Cotización del PBT virgen	238
Figura AXI.7.	Cotización del PET reciclado	239
Figura AXI.8.	Cotización del PBT reciclado	240
Figura AXI.9.	Cotización de los sacos de PP	241

ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Hojas de especificación de las materias primas utilizadas	170
ANEXO II	
Datos experimentales para la determinación de la densidad	174
ANEXO III	
Datos experimentales para la determinación del contenido de cenizas	176
ANEXO IV	
Procedimiento efectuado para la calibración de los calorímetros Netzsch DSC 204 F1 Phoenix y Shimadzu DSC 50	178
ANEXO V	
Termogramas obtenidos para la calibración y validación del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix	189
ANEXO VI	
Termogramas obtenidos para la calibración y validación del calorímetro Shimadzu DSC 50	193
ANEXO VII	
Pesos de los componentes individuales para la preparación de las mezclas en la cámara de mezclado	208
ANEXO VIII	
Balances de masa del proceso de producción de la mezcla 95 % PET y 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados	211
ANEXO IX	
Cálculos realizados para la selección de equipos	213
ANEXO X	
Hojas de especificación de equipos	218
ANEXO XI	
Cotizaciones de los equipos seleccionados y materias primas	229
ANEXO XII	
Cálculos para el análisis económico	242

GLOSARIO

ABS: Copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (IUPAC, 2013, p.1).

HDPE: Polietileno de alta densidad (IUPAC, 2013, p. 3).

PA6: Poliamida 6 (IUPAC, 2013, p. 4)

PA66: Poliamida 66 (IUPAC, 2013, p. 4)

PC: Policarbonato (IUPAC, 2013, p. 5).

PBT: Poli (butilén tereftalato) (IUPAC, 2013, p. 5).

PET: Poli (etilén tereftalato) (IUPAC, 2013, p. 6).

PP: Polipropileno (IUPAC, 2013, p. 8)

PVC: Policloruro de vinilo (IUPAC, 2013, p. 8).

Tefg = Temperatura final extrapolada: “Intersección de la tangente infleccional con la línea base extrapolada para temperaturas sobre la transición vítrea” (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p. 8).

Teig = Temperatura onset extrapolada: “Intersección de la tangente infleccional con la base línea extrapolada para temperaturas bajo la transición vítrea” (Ehrenstein et al. 2004, p. 8).

Tfm = Temperatura final de fusión: “Temperatura correspondiente a la última desviación detectable de la línea base; límite superior para la determinación de la entalpía de fusión” (Ehrenstein et al. 2004, p. 8).

T_{im} = Temperatura onset de fusión: “Temperatura correspondiente a la primera desviación detectable de la línea base; límite inferior para la determinación de la entalpía de fusión” (Ehrenstein et al. 2004, p. 8).

T_{mg} = Temperatura media; Temperatura de transición vítrea: “Temperatura a la cual ha ocurrido la mitad del cambio del calor específico ($0,5 \Delta C_p$); temperatura a la cual la línea que une las líneas base extrapoladas antes y después de la transición vítrea se intersecta con la curva DSC” (Ehrenstein et al. 2004, p. 8).

T_{pm} = Temperatura de pico de fusión: “Temperatura a la cual se funden la mayoría de cristales de un polímero semicristalino” (Ehrenstein et al. 2004, p. 8)

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo principal diseñar una planta piloto para una mezcla miscible de poliésteres y poliamidas comerciales y recicladas, para lo cual se estudiaron los sistemas poli (etilén tereftalato) / poli (butilén tereftalato) (PET/PBT) y poli (etilén tereftalato) / poliamida 6 (PET/PA6).

Después caracterizar individualmente los materiales puros a ser utilizados, se realizaron mezclas de diferentes composiciones en ambos sistemas. Se estudiaron sus propiedades térmicas mediante la calorimetría diferencial de barrido (DSC) y se analizó macroscópicamente la dispersión-distribución de las fases.

El sistema (PET/PBT) presentó miscibilidad entre sus componentes, mientras que el sistema (PA6/PET) fue inmisible en todo el rango de composiciones. La mezcla que presentó mejores propiedades y miscibilidad fue la de composición 95 % PET/ 5 % PBT, la misma que fue validada mediante el uso de materiales reciclados que fueron mezclados y caracterizados de forma similar a la que se hizo con los materiales comerciales.

Los parámetros utilizados (condiciones de secado y temperatura de procesamiento) y la composición de la mezcla seleccionada y probada con material reciclado, sirvieron de base para el diseño a nivel piloto del proceso, el cual incorporó las etapas preliminares y posteriores al mezclado hasta la obtención de un semielaborado. Mediante los balances de masa correspondientes en función de un volumen de producción estimado de 260 kg/día, se seleccionaron los equipos más apropiados: un sistema de secado, una línea de extrusión y un equipo de ensacado. Se obtuvieron los diagramas de bloques y flujo del proceso así como el plano de distribución en planta para una superficie de 500 m².

Finalmente se llevó a cabo un análisis preliminar de costos, para lo cual se buscaron datos actualizados de las materias primas recicladas, diferentes

proveedores de equipos de mezclado de polímeros así como de los sistemas periféricos. De esta forma se determinó que el costo de producción de un saco de 25 kg de mezcla comercial es de \$ 70,36/saco y de mezcla reciclada es \$ 37,57 /saco.

INTRODUCCIÓN

Los polímeros constituyen uno de los materiales más usados debido a su gran diversidad, facilidad de producción y aplicaciones. Estos materiales son a su vez los causantes de uno de los problemas más grandes de contaminación, debido a que la inadecuada disposición de los desechos constituye un peligro ambiental, si no se les da un tratamiento adecuado al concluir su vida útil (Cadena y Quiroz, 2000, p. 1)

Para prevenir la contaminación se requiere de estrategias que tiendan a disminuir la generación de desechos y una alternativa la constituye el reciclaje. A través de un conocimiento detallado del producto final obtenido, es posible volver a utilizar los materiales o sus mezclas en aplicaciones menos críticas. Los incentivos económicos también motivan a los procesadores para convertir los residuos post-consumo de fibras, películas, y botellas en mezclas útiles (Nadkarni y Rathp, 2002, p. 838).

En el Ecuador, en el año 2011 las importaciones de poli (etilén tereftalato), el poliéster con mayores aplicaciones, y de poliamida 6, ascendieron a las 46 000 y 533 toneladas respectivamente. Según datos de EMASEO, en el distrito Metropolitano de Quito se generan 1600 t/día de desperdicios, de los cuales el 13,12 % corresponde a plásticos. De este porcentaje solo se recupera el 8 %, lo cual indica el problema ambiental que se genera y hace indispensable el reciclaje de estos materiales provenientes de recursos no renovables (Aseplas, 2011; p. 34; EMASEO, 2010, p. 2).

Este estudio busca establecer la factibilidad de determinar las relaciones de miscibilidad de los sistemas binarios de poliésteres y poliamidas. Los resultados obtenidos permitirán determinar las proporciones en las cuales son miscibles, de manera de determinar su potencial desarrollo. Esto es de gran importancia en el reciclado de materiales, en donde es conveniente determinar pequeñas proporciones de otros componentes presentes en materiales puros.

1 PARTE TEÓRICA

1.1 MEZCLAS DE POLIÉSTERES Y POLIAMIDAS

1.1.1 GENERALIDADES

Los poliésteres y poliamidas son polímeros de ingeniería, llamados así debido a que poseen propiedades específicas que son aprovechadas para aplicaciones que requieren un desempeño eficiente de los materiales a ser utilizados. Entre algunas características que poseen se encuentran: buena resistencia a la fluencia e impacto, estabilidad dimensional y procesabilidad (Bottenbruch, 1996, p. 1; Woebcken, 1995, p. 22).

Como se muestra en la Figura 1.1, los polímeros de ingeniería se encuentran distribuidos en una pirámide en donde, aquellos que poseen propiedades superiores se encuentran ubicados en la cúspide y los polímeros de propiedades intermedias forman la base. También se observa que desde la base hasta la cima, el costo incrementa y el volumen de producción disminuye (Bottenbruch, 1996, p. 1).

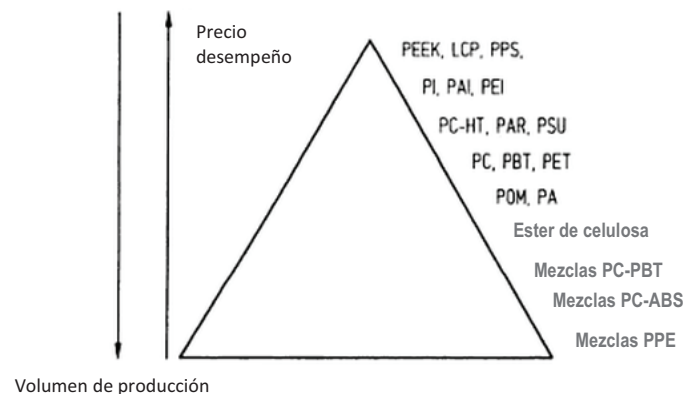


Figura 1.1. Termoplásticos de ingeniería
(Bottenbruch, 1996, p. 1)

La mayoría de aplicaciones requieren una combinación de las propiedades antes mencionadas, lo cual exige a los procesadores de plásticos el empleo de técnicas

que permitan obtener productos en los cuales la relación precio / rendimiento desempeña un papel clave (Calhoun y Peacock, 2006, p. 353).

En la Figura 1.2 se observa la producción mundial de plásticos en el año 2011.



Figura 1.2. Producción mundial de plásticos por tipo en el año 2011
(Plastics Europe Market Research Group, 2012, p. 9)

Aunque los polímeros de ingeniería abarcan solamente un pequeño porcentaje del total de termoplásticos producidos, éste no refleja la importancia de los materiales. El peso o fracción en volumen de un polímero de ingeniería en un auto, radio o televisión suele ser bastante baja; sin embargo, la parte polimérica del aparato frecuentemente mejora el desempeño o hace posible que la producción del dispositivo sea más económica (Bottenbruch, 1996, p. 2).

Según Plastics Europe Market Research Group (2012), el consumo de polímeros de ingeniería se incrementó de 10 millones a más de 40 billones de libras desde el año 1953 hasta el 2009, lo cual indica el rápido crecimiento de la industria de este tipo de materiales (p. 10). En la Figura 1.3 se muestra la demanda mundial de los polímeros estándar y de ingeniería en el año 2011, en la cual se puede observar que existe una demanda considerable de poliésteres (PET y PBT) y poliamidas (PA) debido a sus múltiples usos en el campo textil, alimenticio, automotriz, etc.

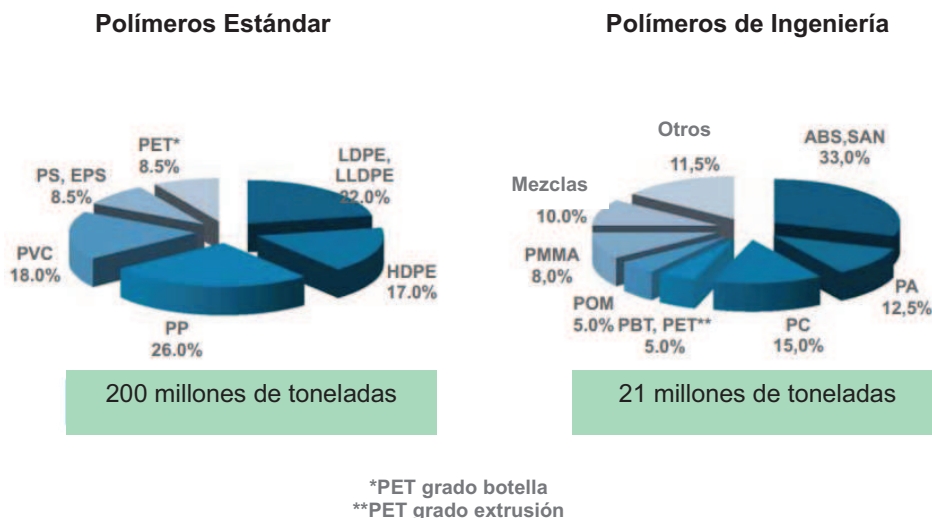


Figura 1.3. Demanda mundial de termoplásticos por tipo en el año 2011
(Plastics Europe Market Research Group, 2012, p. 11)

1.1.2 POLIÉSTERES TERMOPLÁSTICOS: POLI (ETILEN TEREFALATO) (PET) Y POLI (BUTILEN TEREFALATO) (PBT)

1.1.2.1 Nomenclatura y obtención

El Poli (etilén tereftalato) (PET) y el poli (butilén tereftalato) (PBT) son poliésteres obtenidos a partir de la reacción entre un dimetil tereftalato con un dialcohol y su estructura molecular básica es la siguiente es la que se muestra en la Figura 1.4.

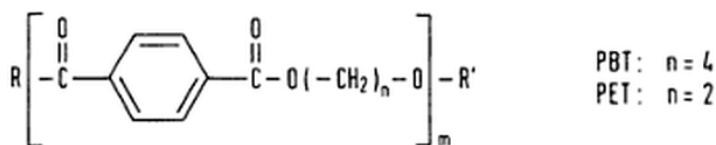


Figura 1.4. Unidad constitucional repetitiva de PET y PBT
(Binsack, 1996, p. 6)

La preparación de estos poliésteres vía condensación involucra las siguientes etapas (Binsack, 1996, p. 8; Calhoun y Peacock, 2006, p. 354; De Abajo y Guzman, 2000, p. 78):

- 1) Transesterificación de dimetil tereftalato con etilenglicol (PET) o con 1,4-butanodiol (PBT) en presencia de un catalizador (óxido metálico, acetato, compuesto organometálico, etc.) a altas temperaturas (150-220 °C) para formar dihidroxiethyltereftalato o dihidroxi-butyltereftalato y alcohol como subproducto, el cual debe ser destilado durante la reacción.
- 2) Policondensación en estado fundido de los precondensados obtenidos de la transesterificación, la cual se da a temperaturas entre 250-270 °C para la obtención de PBT y entre 270-285 °C para PET. El glicol que se obtiene como subproducto deber ser removido al vacío para acelerar la policondensación.

Para la obtención de PET y PBT puede sustituirse el dimetil tereftalato por ácido tereftálico, el cual presenta ventajas como: bajo precio, no se necesita catalizadores para la transesterificación, policondensación a mayor velocidad, pequeña cantidad de grupos carboxílicos terminales y no se requiere recuperación de alcohol (Binsack, 1996, p. 11).

En la Figura 1.5 se observa las reacciones de formación de PET y PBT.

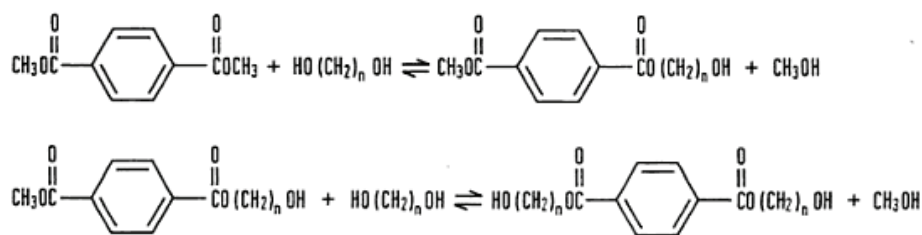


Figura 1.5. Reacciones de polimerización de PET y PBT
(Binsack, 1996, p. 15)

Ciertos procesos de inyección y extrusión requieren materiales con mejores propiedades y mayor peso molecular que no pueden ser obtenidos mediante policondensación, debido a que tiempos prolongados de reacción y altas temperaturas provocan degradación. El PBT con peso molecular mayor a 40 000 y el PET con peso mayor a 30 000 se preparan por policondensación en fase sólida, de manera que dos cadenas del polímero reaccionan a través de sus

grupos terminales y crean una cadena de mayor longitud que las iniciales. Estas reacciones se dan a temperaturas menores a las de fusión de los poliésteres debido a que éstas favorecen la formación antes que la degradación (Binsack, 1996, p. 16; Calhoun y Peacock, 2006, pp. 356-357).

1.1.2.2 Estructura y morfología

El PBT posee una cristalinidad de alrededor del 40 %. La velocidad de cristalización durante el enfriamiento en estado fundido es muy alta debido a que la cadena de cuatro carbonos derivada del 1,4-butanodiol crea una estructura más flexible que permite que las cadenas se reorganicen fácilmente (Calhoun y Peacock, 2006, p. 359).

El PBT cristaliza en dos estructuras diferentes, las cuales pueden transformarse reversiblemente la una en la otra. La forma alfa (α) es termodinámicamente estable y es observada cuando se lleva a cabo un enfriamiento lento. La forma beta (β) se genera cuando la estructura es estirada axialmente a elevadas temperaturas o al ser enfriada rápidamente (Binsack, 1996, p. 47, Calhoun y Peacock, 2006, p. 359). En la Figura 1.6 se observan las dos estructuras cristalinas de PBT.

Las temperaturas de transición vítrea y de fusión se encuentran en los rangos de 40 a 60 °C y 220 a 245 °C respectivamente y dependerán de la cristalinidad, orientación, cargas y aditivos y métodos de determinación (Binsack, 1996, p. 48; Ehrenstein et al., 2004, p. 334).

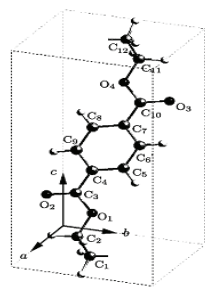
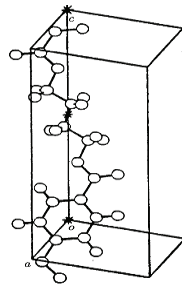
Estructura cristalina α Estructura cristalina β

Figura 1.6. Estructuras cristalinas de PBT
(Geil, 2002, pp. 159, 161)

Por el contrario, el PET posee una sola forma de cristalización, la cual corresponde a una estructura triclinica única y se observa en la Figura 1.7. Este material tiene una velocidad de cristalización muy baja debido a la menor movilidad de su cadena molecular, lo cual impide el aumento de la densidad de los cristales a temperaturas superiores a los 200 °C. La cristalización lenta permite su obtención en estado amorfo, que lo hace útil para aplicaciones como películas delgadas o botellas para bebidas carbonatadas. (Binsack, 1996, p. 50; Calhoun y Peacock, 2006, p. 359; Geil, 2002, p. 109).

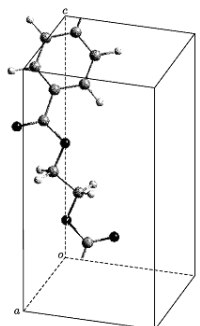


Figura 1.7. Estructura cristalina de PET
(Geil, 2002, pp. 133)

La temperatura de transición vítrea del PET depende de su pureza, historia térmica, así como del método de determinación. Su valor se halla en el rango de los 60 a 90 °C (Andrews y Grulke, 1999, p. 253; Binsack, 1996, p. 50).

El PET funde a temperaturas entre los 250 a 285 °C, variaciones que se deben a la presencia de impurezas que disminuyen la cristalinidad. La formación de

dietilenglicol durante la síntesis del PET, constituye una de las razones para el descenso en la temperatura de fusión y cristalinidad, la cual depende de la temperatura, tiempo de cristalización, varía entre 0 y 61 % (Binsack, 1996, p. 19; Marechal, 2002, p. 28)

Muchas propiedades importantes que poseen los poliésteres se deben en parte a su cristalinidad, la cual depende de las condiciones de procesamiento y de la nucleación, que es el proceso por el que se forman los núcleos primarios del cristal (Billmeyer, 2004, p. 164; Binsack, 1996, p. 24).

La nucleación puede ser homogénea si los movimientos moleculares del polímero en estado fundido, provocan el alineamiento de un suficiente número de segmentos de la cadena a una forma más estable; o heterogénea si los núcleos se forman a partir del simple contacto de la sustancia con el recipiente contenedor o a partir de partículas insolubles microscópicas distribuidas aleatoriamente en el material. Si existe una elevada concentración de núcleos, se desarrollarán estructuras cristalinas finas y el material será relativamente transparente, si por el contrario solo existe un pequeño número de núcleos, se desarrollarán estructuras más gruesas y el material será opaco (Calhoun y Peacock, 2006, p. 122).

Bajo ciertas condiciones de procesamiento, el PBT cristaliza tan rápido que el uso de agentes nucleantes heterogéneos es innecesario. La temperatura óptima de cristalización isotérmica es 195 °C. (Binsack, 1996, p. 50).

1.1.2.3 Propiedades

- **Propiedades tensiles y resistencia al impacto**

Los poliésteres poseen una excelente resistencia a la tracción y una elongación a la ruptura relativamente baja. Al comparar un PBT con un PET de igual peso molecular y grado de cristalización, se evidencia que éste último es más frágil y tiene una elongación a la ruptura más baja debido a la menor cantidad de

cadena de etileno flexibles presentes en su estructura (Calhoun y Peacock, 2006; p. 359).

Aunque los poliésteres son materiales resistentes, son inadecuados para aplicaciones sensibles al impacto, razón por la cual son reforzados con fibra de vidrio o modificadores que aumentan su fuerza y resistencia (Binsack, 1996, p. 51).

En la Tabla 1.1 se observan los valores de ciertas propiedades mecánicas de PET y PBT:

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de PET y PBT

PROPIEDAD	MÉTODO DE PRUEBA	PET	PBT
Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Tensil	50	55
Módulo de Young (MPa)	-	1 700	2 280
Elongación a la ruptura (%)	Tensil	4	3,7
Resistencia al Impacto (J/m)	ASTM D256-86	40	53

(Awaja y Pavel, 2005; p. 1455; Radusch, 2002; p. 401)

- **Permeabilidad**

En materiales semicristalinos, la impermeabilidad a los gases es una consecuencia de la presencia de extensas regiones cristalinas en el polímero sólido; por otro lado, en materiales amorfos, ésta surge del proceso de orientación durante la manufactura, el cual establece regiones que inhiben el paso de las moléculas de gas desde una superficie a otra (Calhoun y Peacock, 2006, p. 360).

Las propiedades barrera del PBT son muy similares a las del PET. Este último presenta permeabilidad al vapor de agua superior con relación a las poliolefinas pero inferior a la de policarbonatos y poliamidas. En cuanto al oxígeno y CO₂, ésta es considerablemente baja, lo cual es aprovechado para la elaboración de

botellas de bebidas carbonatadas y empaques para alimentos (Binsack, 1996, p. 74; Calhoun y Peacock, 2006, p. 360).

1.1.2.4 Degradación

Los poliésteres son susceptibles de experimentar hidrólisis tres veces más rápido que las reacciones de degradación térmica y cuatro veces más rápido que las termooxidativas (Calhoun y Peacock, 2006, p. 357).

El PET y PBT en forma sólida, absorben humedad del medio ambiente hasta alcanzar un equilibrio. Durante la hidrólisis, a altas temperaturas y presiones, el agua atraviesa los enlaces éster y rompe las cadenas del polímero, lo que ocasiona que se reduzca el peso molecular y sus propiedades características. En la Figura 1.8 se muestra la reacción de hidrólisis de los poliésteres (Binsack, 1996, p. 73; Calhoun y Peacock, 2006, p. 357; Automatismo Industrial, 2006, p. 7).

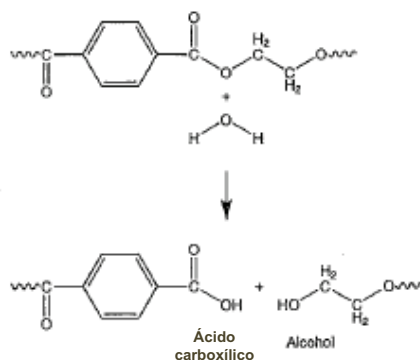


Figura 1.8. Hidrólisis de poliéster
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 358)

Esta reacción puede ocurrir en el sólido a temperaturas desde 150 °C y a poca velocidad. A medida que la temperatura se incrementa, la velocidad de hidrólisis también aumenta como se muestra en la Figura 1.9 (Automatismo Industrial, 2006, p. 7):

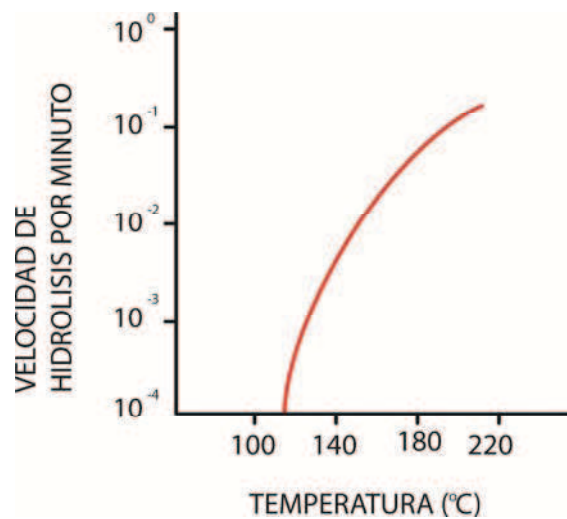


Figura 1.9. Hidrólisis del PET en función de la temperatura
(Automatismo Industrial, 2006, p. 7):

Para prevenir la hidrólisis, se debe remover la humedad antes del procesamiento mediante el secado de la resina a alta temperatura, debido a que pequeñas cantidades de agua menores a 0,01 % pueden ocasionar notable reducción de la viscosidad originada por la disminución del peso molecular (Calhoun y Peacock, 2006, p. 358).

1.1.2.5 Aplicaciones

En la Tabla 1.2 se muestran los principales usos del PET y PBT. En cada caso se indica el método de transformación usado.

1.1.3 POLIAMIDA 6 (PA6)

1.1.3.1 Nomenclatura y Obtención

La Poliamida 6 (PA6) es un polímero alifático obtenido a partir de la ϵ -caprolactama y su estructura molecular básica se muestra en la Figura 1.10

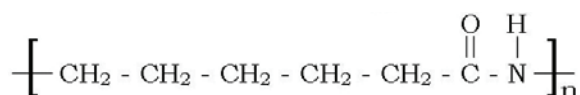


Figura 1.10. Unidad constitucional repetitiva de PA6
(Nexant, 2009, p. 2)

Existen dos métodos de obtención de la PA6:

Polimerización hidrolítica o por apertura de anillo: Como se observa en la Figura 1.11 (a), la reacción se inicia con la apertura del anillo de ϵ -caprolactama para formar ácido 6-aminohexanóico en presencia de agua, a temperaturas entre los 250 – 270 °C. Si existe abundante cantidad de agua (10 – 20 %), se producirá una condensación en la cual los grupos carboxílicos y amino reaccionan con la eliminación de agua, como se muestra en la Figura 1.11 (b); caso contrario, la reacción dominante será de adición, en la cual una molécula de caprolactama se agrega directamente al grupo terminal de la cadena polimérica como se presenta en la Figura 1.11 (c). Con el fin de limitar el peso molecular promedio del producto final, se agregan pequeñas cantidades de un terminador monofuncional como el ácido acético (Augstkalns, 1995, p. 24; Calhoun y Peacock, 2006; p. 343).

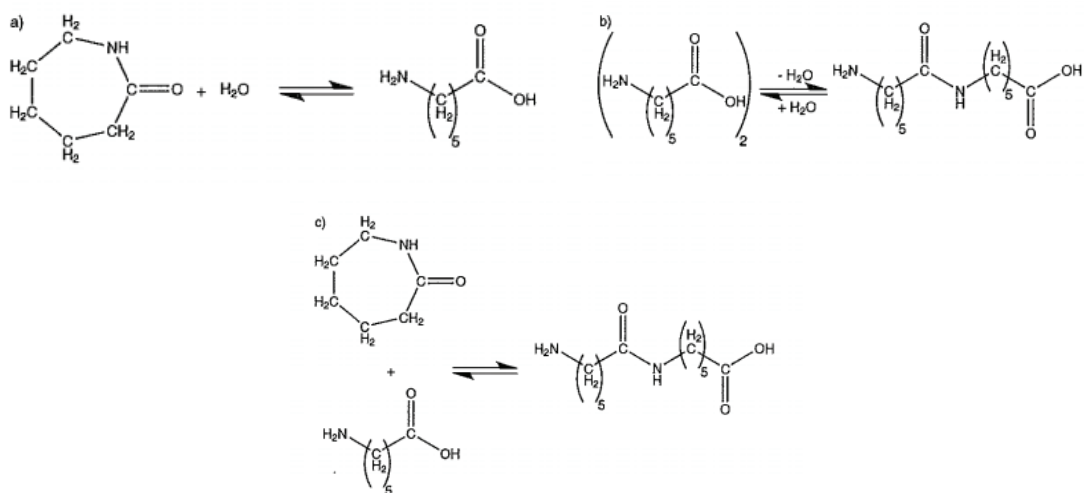
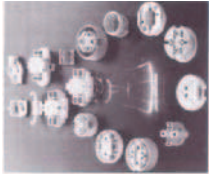




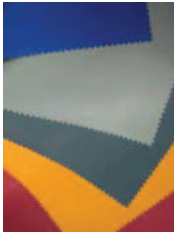



Figura 1.11. Reacciones principales durante la polimerización de la PA6: a) apertura hidrolítica del anillo para la formación del ácido, b) condensación de dos moléculas de ácido, y c) adición directa de caprolactama a la cadena del polímero en crecimiento (Calhoun y Peacock, 2006; p. 343)

Tabla 1.2. Principales aplicaciones de PET y PBT

Método de Transformación	PBT		PET
Moldeo por inyección	 Casquillos de bombillas de luz	 Carcasas de planchas	 Teclas de computadora
Extrusión	 Películas de recubrimiento para alimentos y empaques	 Películas fotográficas	 Telas para ropa
Moldeo por soplado	 Botellas de bebidas carbonatadas, aceites de cocina, detergentes y agua		

(Binsack, 1996, pp. 96-101; Calhoun y Peacock, 2006, p. 361)

Polimerización aniónica: Esta vía de obtención es utilizada para la fabricación de piezas de gran tamaño con peso molecular alto. Su cinética es dependiente del tipo de acelerador e iniciador debido a que se trata de un tipo de polimerización por adición. Entre los catalizadores comunes se encuentran los metales alcalinos, amidas de metales alcalinos, alcóxidos, alquilos, arilos, hidróxidos y cianuros (Augstkalns, 1995, p. 29).

1.1.3.2 Estructura y morfología

La disposición molecular dentro de los cristales de la PA6 tiene como objeto maximizar los enlaces hidrógeno entre las cadenas adyacentes, lo cual se facilita debido a que las cadenas adoptan una conformación planar zig-zag con dipolos perpendiculares a los ejes de las cadenas dentro del plano de la molécula (Calhoun y Peacock, 2006, p. 345).

La PA6 puede cristalizar en dos formas estables: la forma alfa (α) contiene enlaces de hidrógeno entre las cadenas antiparalelas que se encuentran alineadas 180° una con otra y la forma gamma (γ), la cual posee enlaces hidrógeno entre las cadenas paralelas; sin embargo, usualmente cristaliza en la forma alfa (Clark y Xenopoulos, 1995, p. 115). En la Figura 1.12 se muestra las dos estructuras cristalinas de PA-6.

La temperatura de transición vítrea o relajación alfa disminuye linealmente con la humedad relativa, debido al efecto plastificante provocado por los enlaces de hidrógeno que se forman entre los grupos amida y el agua absorbida por el material. Los valores de T_g para la PA6 seca se encuentran entre los $47-57^\circ\text{C}$ (Starkweather, 1995, p. 147).

Los enlaces hidrógeno también dan estabilidad a la estructura cristalina y contribuyen a altos puntos de fusión. Estos enlaces existen aún en el estado fundido, lo cual provoca la presencia de altas temperaturas de cristalización en comparación con otros polímeros de cadena flexible como polietilenos y

poliésteres. El punto de fusión de una poliamida es directamente proporcional con la concentración de grupos amida y los valores para la PA-6 se encuentran entre los 220 – 230 °C (Calhoun y Peacock, 2006; p. 348; Starkweather, 1995, p. 141).

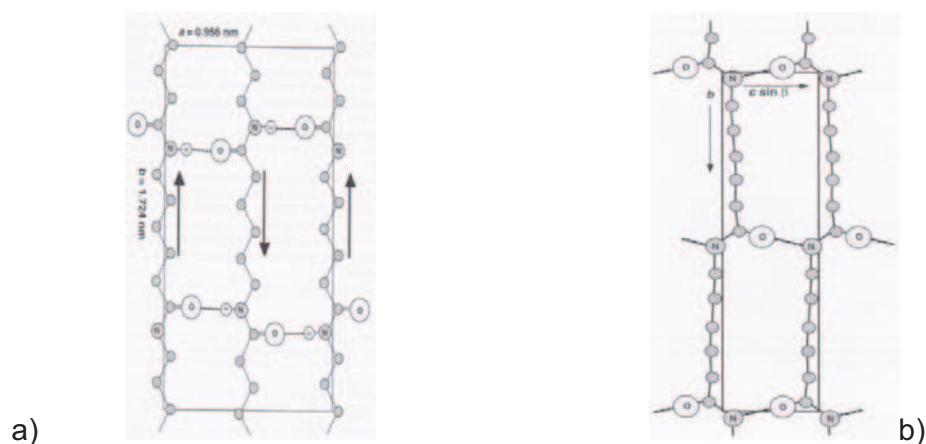


Figura 1.12. Estructuras cristalinas del nylon 6: a) forma alfa (α) y b) forma gamma (γ) (Xenopoulos y Clark, 1995, pp. 115-116)

Como se puede observar en la , al cristalizar la poliamida desde el estado fundido forma esferulitas, las cuales consisten en laminillas que irradian en todas las direcciones a partir de puntos de nucleación. A mayor densidad de nucleación, se obtienen esferulitas más pequeñas. Los cristales que se forman al orientar el material fundido tienen alta resistencia a la tracción al ser estiradas paralelamente, lo cual es favorable para la obtención de fibras. El porcentaje de cristalinidad es de alrededor del 50 % y su temperatura de cristalización promedio es de 132 °C (Calhoun y Peacock, 2006, p. 347; Starkweather, 1995, p. 120).

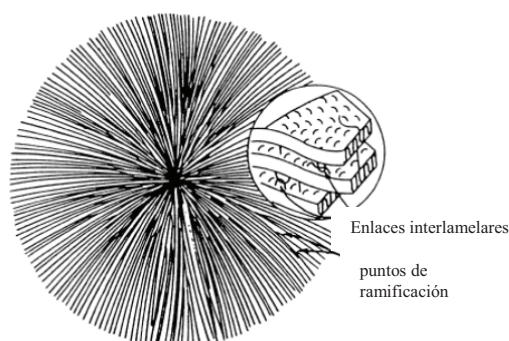


Figura 1.13. Representación esquemática de la textura esferulítica de un polímero semicristalino (Everaert, Groeninckx y Vanneste, 2002, p. 208)

1.1.3.3 Propiedades

- **Propiedades tensiles y resistencia al impacto**

El agua tiene un gran efecto en las propiedades de las poliamidas, debido a que promueve la formación de puentes hidrógeno con los grupos amida en las regiones no cristalinas. Esto provoca la interrupción de los enlaces hidrógeno entre las cadenas y ocasiona una lubricación interna. A menor cristalinidad, mayor humedad absorbida y como consecuencia existe una disminución de la resistencia a la tracción, elongación a ruptura, rigidez y estabilidad dimensional del material (Calhoun y Peacock, 2006, p. 349).

En Tabla 1.3 se observan los valores de ciertas propiedades mecánicas de PA-6:

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas de PA-6

PROPIEDAD	MÉTODO DE PRUEBA	PA-6
Esfuerzo a la ruptura (MPa)	ASTM D638	70-80
Módulo de Young (MPa)	-	2 200-3 200
Elongación a la ruptura (%)	ASTM D638	15-200
Resistencia al Impacto (J/m)	ASTM D256	45-65

(Galanty y Rao, 1995, p. 532)




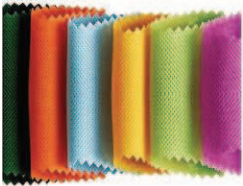


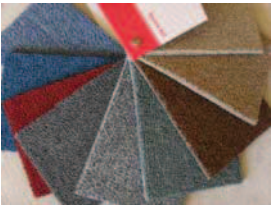
- **Absorción de agua**

Un efecto negativo de la naturaleza higroscópica de las poliamidas, además de disminuir sus propiedades mecánicas y transiciones térmicas, es la dificultad en su procesamiento. Es necesario secarlas antes de proceder a moldearlas, ya que al extruir un material húmedo, el agua se evapora dentro de la extrusora lo que ocasiona la aparición de burbujas en el fundido, que da como resultado un producto no uniforme con vacíos e irregularidades en su superficie. El contenido de agua recomendado para el procesamiento de la PA-6 es de 0,2 % (Roder, 1995, pp. 171-173).

1.1.3.4 Aplicaciones

En la Tabla 1.4 se muestran los principales usos de la PA- 6. En cada caso se indica el método de transformación usado

Tabla 1.4. Principales aplicaciones de PA-6

MOLDEO POR INYECCIÓN		
 <p>Hebillas de mochilas</p>	 <p>Ruedas de patines</p>	
 <p>Aspas de ventiladores</p>		
EXTRUSIÓN		
 <p>Telas</p>	 <p>Cuerdas trenzadas y de pescar</p>	 <p>Cerdas de cepillos de dientes y brochas para cosméticos</p>
 <p>alfombras</p>		

(Galanty y Rao, 1995, p. 540-541)

1.1.4 MEZCLAS

1.1.4.1 Tipos de Mezclas

Al mezclar dos polímeros se puede obtener una mezcla homogénea o heterogénea en la cual se forman dos o más fases. Los términos más usados en literatura son los relacionados a las mezclas miscibles e inmiscibles (Herman, 2004, p. 1).

a) Mezclas miscibles

Las mezclas miscibles se definen como aquellas cuyo comportamiento es similar al de un sistema monofásico y sus propiedades son una combinación de las propiedades de los componentes puros. Los parámetros que afectan a las propiedades de mezclas miscibles son la estructura química, peso molecular, concentración e interacciones intermoleculares que se dan entre sus constituyentes (Olusesan, Rotimi, Sadiku y Taoreed, 2011, p. 34).

Las condiciones para que un sistema binario sea miscible, bajo ciertas condiciones de presión, temperatura y composición, son las siguientes (IUPAC, 2004, p. 1987; Robeson, 2012, p. 11):

$$\Delta G_m < 0 \quad [1.1]$$

$$\left(\frac{\partial^2 \Delta G_m}{\partial \phi^2} \right)_{T,P} > 0 \quad [1.2]$$

Donde:

ΔG_m = Energía libre de Gibbs de mezcla

ϕ = Fracción en volumen de uno de los componentes

T = Temperatura

P = Presión

La entropía es un factor que afecta a la miscibilidad de los componentes de una mezcla y está directamente asociada con la energía libre de Gibbs como lo muestra la siguiente relación (Robeson, 2012, p. 11):

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad [1.3]$$

Donde:

ΔH_m = Calor de mezcla

ΔS_m = Entropía de mezcla

El calor de mezcla puede escribirse como se muestra a continuación (Luengo, 1993, p. 9):

$$\Delta H_m = \frac{\chi_{12}RT}{V_r} V\phi_1\phi_2 \quad [1.4]$$

Donde:

χ_{12} = Parámetro de interacción de Flory-Huggins

R = Constante de los gases

V = Volumen total

V_r = Volumen segmental de referencia (cercano al volumen de la unidad polimérica repetitiva más pequeña)

ϕ_1 = Fracción en volumen del componente 1

Las relaciones anteriormente descritas indican que deben darse interacciones específicas entre los polímeros a mezclarse para que se origine un calor de mezcla negativo y se favorezca su miscibilidad. Existen relaciones empíricas que

asocian el parámetro χ_{12} con relaciones físicas como el calor de mezcla, calor específico y el peso molecular; sin embargo, no se han encontrado conceptos que sean capaces de proporcionar su dependencia correcta con la temperatura, presión, composición, peso molecular y polidispersidad (Luengo, 1993, p. 9).

b) Mezclas inmiscibles

Una mezcla polimérica inmiscible es aquella en la que sus componentes no forman una sola fase debido a un exceso de energía libre causada por la existencia de una tensión interfacial, que surge del desequilibrio de las fuerzas moleculares entre los dos componentes de la mezcla (IUPAC, 2004, p. 1990; Olusesan et al. 2011, p. 34).

La mayoría de mezclas binarias poliméricas son inmiscibles. Sus propiedades físicas están en función de la composición de las dos fases, la forma del polímero en la fase y la conectividad entre los dos componentes, lo que da como resultado materiales con débil adhesión interfacial y propiedades mecánicas pobres (Calhoun y Peacock, 2006, p. 188; Olusesan et al. 2011, p. 34).

1.1.4.2 Mezclado dispersivo y distributivo

El mezclado es una operación importante en el procesamiento de polímeros en estado fundido y está directamente relacionado con la calidad del producto a ser obtenido. Una adecuada selección de los parámetros y equipos, permite conseguir un material homogéneo y de propiedades constantes. Se distinguen dos tipos de mezclado: dispersivo y distributivo (Rauwendaal, 1998, p. 74; Shi y Utracki, 2002, p. 578).

El mezclado **dispersivo o intensivo** establece la aplicación de esfuerzos que reduzcan el tamaño del componente cohesivo, lo cual permite disminuir la

segregación y mejorar la calidad del mezclado (Rauwendaal, 1998, p. 49; Shi y Utracki, 2002, p. 578).

El mezclado **distributivo o extensivo** involucra la aplicación de tensiones que permitan el reordenamiento de los componentes de la mezcla, con el fin de reducir la falta de uniformidad sin necesidad de reducción de tamaño de las partículas cohesivas (Rauwendaal, 1998, p. 25; Shi y Utracki, 2002, p. 578).

Para garantizar que una mezcla sea eficiente, se debe tener un apropiado balance entre los dos tipos de mezclado. En la Figura 1.14 se muestra, de manera gráfica, la dispersión y distribución de un componente menor en un componente mayor siguiendo los dos mecanismos de mezclado. En la parte superior, se observa que si primero se aplica un mezclado puramente dispersivo, se rompen las partículas, pero no se distribuyen. En la parte inferior, se altera el orden. Aunque ambas situaciones son ideales, debido a que es imposible separar el mezclado distributivo del dispersivo y viceversa, el resultado final que se obtiene es el mismo.

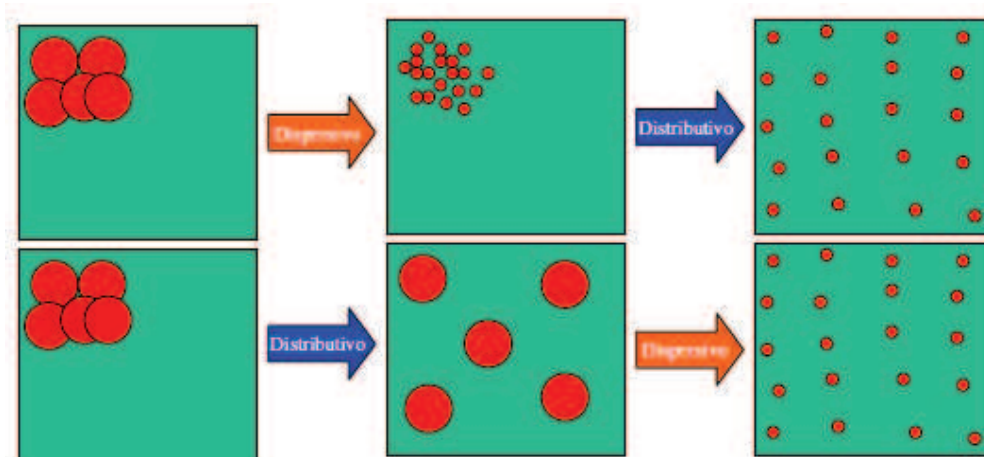


Figura 1.14. Mezclado dispersivo y distributivo de un componente menor (rojo) en un componente mayor (verde)
(Polinter, 2011, p. 2)

1.1.4.3 Equipos de mezclado

a) Extrusoras mono husillo

La extrusión es un proceso continuo de transformación de plásticos con el cual se obtiene perfiles de sección transversal constante. Entre las diversas aplicaciones se encuentran: fabricación de películas tubulares, tuberías, recubrimientos, láminas y monofilamentos (Morales, 2010, p. 227).

La **extrusora monohusillo** es uno de los equipos más usados en la industria del plástico, dentro de sus principales ventajas están su relativo bajo costo, diseño sencillo, robustez y favorable relación calidad-precio con relación a otros equipos de mezclado (Rauwendaal, 2001, p. 11).

En la Figura 1.15 se observa el esquema de una extrusora monohusillo convencional en el cual se distinguen sus principales elementos.

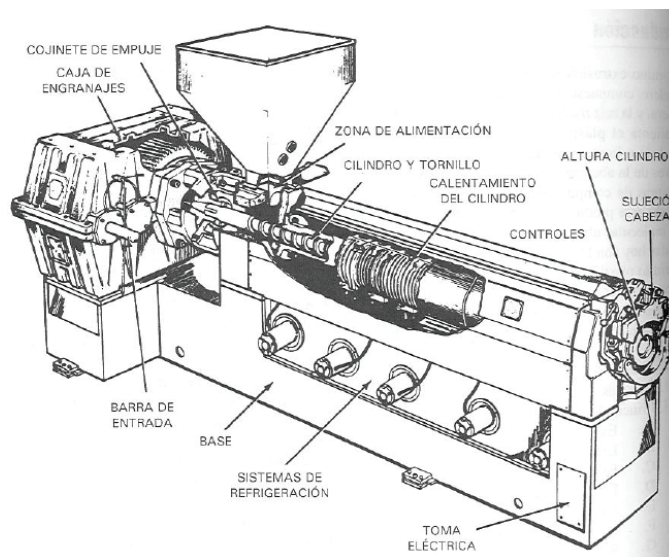


Figura 1.15. Elementos de una extrusora monohusillo convencional (Lokensgard y Richardson, 2000, p. 190)

Husillo: El husillo es una de las partes más importantes de la extrusora, consiste en una barra metálica rodeada por un filete helicoidal, la cual cumple las

funciones de recibir, transportar, fundir y mezclar el material. La eficiencia del proceso y la calidad del producto obtenido dependen en gran medida del diseño del tornillo (Beltrán y Marcilla, 2011, p. 107).

En la Figura 1.16 se muestra un husillo para la extrusión de plástico y las zonas o secciones en que se divide el mismo:

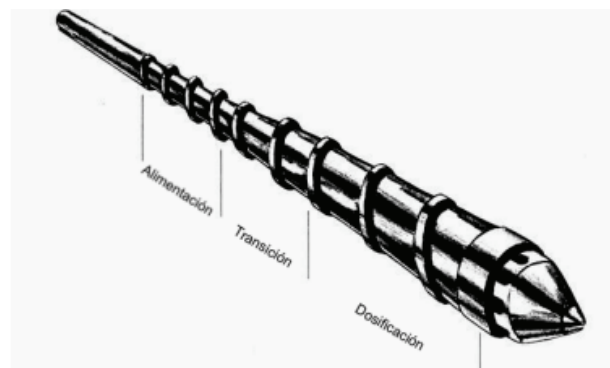


Figura 1.16. Zonas básicas de un husillo de extrusión
(Rosato y Rosato, 1989, p. 9)

Zona de alimentación: En esta sección el polímero entra en forma de pellets al canal mientras el tornillo gira, la mayoría de husillos tienen una sección de paso y profundidad constante en esta zona. El material se mueve hacia las secciones siguientes por la acción de los filetes del husillo (Rosato y Rosato, 1989, p. 162).

Zona de transición o compresión: En esta zona, el diámetro del husillo se incrementa y como resultado, la resina se comprime y se calienta hasta su punto de fusión. La profundidad del filete disminuye en dirección de la descarga (Rosato y Rosato, 1989, p. 162).

Zona de dosificación: En esta sección se logra calentar el material en forma homogénea y se realiza una buena mezcla del material. Mediante la reducción del área del canal, se logra un efecto de bomba con lo que el material sale de forma constante y sin turbulencia (Rosato y Rosato, 1989, p. 162).

Diámetro (D): El diámetro es la dimensión que influye directamente en la producción, generalmente crece en proporción con la dimensión del equipo. Al incrementar el diámetro debe incrementarse también la longitud de la extrusora para que de esta manera que se produzca una mejor plastificación. Las dimensiones varían de 19,5 a 609, 6 mm dependiendo de la aplicación (Morales, 2010, p. 241).

La **Relación L/D** es la relación entre la longitud y el diámetro del tornillo. El valor más adecuado se define por el proceso, material procesado y aplicaciones que deban satisfacerse (Morales, 2010, p. 242).

Según Rosato y Rosato (1998), existen algunas consideraciones para seleccionar entre una relación L/D corta o larga (p. 152):

Ventajas de una relación L/D corta

- Menor tiempo de permanencia en el barril, lo que reduce las posibilidades de degradación lo cual es necesario en materiales sensibles al calor.
- Equipo menos espacioso
- Requiere menos torque
- Menor costo de inversión inicial y para el reemplazo de las partes

Ventajas de una relación L/D larga

- Permite fabricar un equipo con el cual se obtenga una producción mayor siempre y cuando se aplique el torque suficiente
- El husillo puede ser diseñado para un flujo más uniforme y un mejor mezclado
- Permite el bombeo a elevadas presiones
- Mejor fusión con menos esfuerzo cortante y una mejor distribución del calor a lo largo del barril.

Las relaciones L/D típicas son 24:1 y 30 o 32:1, aunque hay aplicaciones especiales donde las extrusoras son de 10:1 o alcanzan 50:1 (Morales, 2010, p. 242).

Relación de compresión (RC): La relación entre la profundidad del filete en la alimentación y la profundidad del filete en la descarga se denomina relación de compresión. En el proceso de extrusión, el material se funde por elevación de la temperatura y por acción mecánica. Ésta última incluye los esfuerzos de corte y el arrastre que empujan el polímero hacia la boquilla y originan un incremento en la presión (Beltrán y Marcilla, 2011, p. 115; Morales, 2010, p. 250).

b) Mezcladores internos por cargas

Los mezcladores internos por cargas son ampliamente usados en la industria del caucho. Según Rauwendaal (1998), se pueden mencionar las ventajas y desventajas que se muestran en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Ventajas y desventajas de los mezcladores internos por cargas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alimentación de varios tamaños y formas	No es un equipo de autolimpieza
Acción intensiva de mezclado	Las variaciones de una carga a otra pueden afectar la calidad del producto
Tiempo de residencia definido	Dificultad para lograr un buen control del proceso
Facilidad para realizar rápidos cambios de material	Dificultad para manipular plásticos de ingeniería a elevadas temperaturas
Amplio rango de procedimientos de mezclado	

(Rauwendaal, 1998, pp. 153-154)

Como se observa en la Figura 1.17, los componentes básicos de un mezclador interno son: rotores, cámara de mezclado, pistón, entrada de aire, tolva de alimentación y puerto de descarga (Giménez y Osswald, 2008, p. 135).

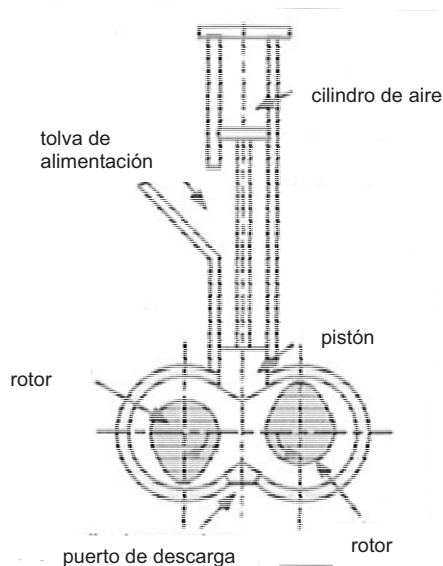


Figura 1.17. Esquema de un mezclador interno por cargas
(Rauwendaal, 1998, p. 154)

Los mezcladores internos usualmente están equipados con rotores no engranados, los cuales poseen diferentes geometrías dependiendo el tipo de material a procesar. La Tabla 1.6 muestra algunos tipos de rotores y sus aplicaciones más frecuentes.

Tabla 1.6. Tipos de rotores y sus aplicaciones

TIPO DE ROTOR	APLICACIONES
Roller	Termoplásticos (poliolefinas, PVC, etc.)
Banbury	Elastómeros (caucho)
Cam	Termoplásticos muy viscosos que requieren un mayor torque (alimentos)
Sigma	Alimentos que necesitan un torque limitado

(Thermo Electron Corporation, 2007, p. 6)

En la Figura 1.18 se observa la curva torque vs tiempo de un proceso de mezcla. Al cargar el material a ser mezclado, el torque aumenta bruscamente mientras el pistón empuja el material dentro de la cámara de mezclado. Por acción del movimiento de los rotores y la temperatura, el material se funde y el torque disminuye hasta alcanzar un valor constante, lo cual indica que la mezcla se ha homogenizado totalmente y puede ser extraída de la cámara de mezcla (Rauwendaal, 1998, p. 155).

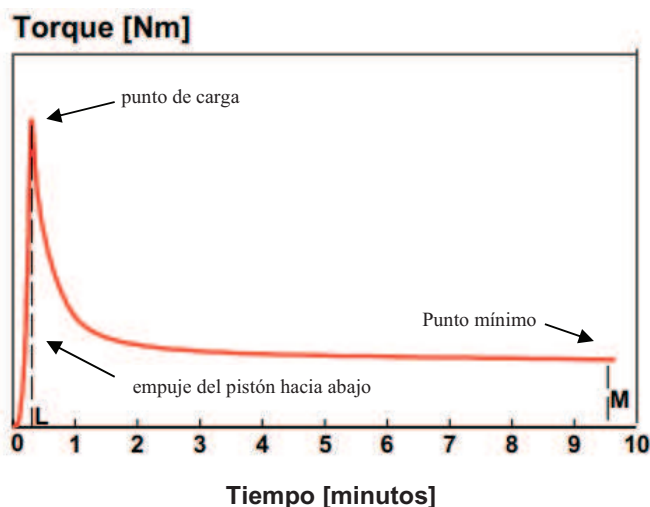


Figura 1.18. Curva torque vs tiempo para un mezclador interno
(Thermo Electron Corporation, 2007, p. 9)

1.1.4.4 Mezclas de Poliésteres

- **Mezclas PET / PBT**

Estas mezclas son de gran interés a causa de ciertas propiedades como: excelente aspecto superficial y brillo, alta resistencia a la deformación, fuerza y rigidez sobre todo si se encuentran reforzadas con vidrio, buen rendimiento a altas temperaturas y considerable costo beneficio debido a que el PET es mucho más barato, y con mayor razón si éste es reciclado (Binsack, 1996, p. 40; Nadkarni y Rath, 2002, p. 838).

Los componentes de las mezclas PET / PBT son miscibles en la fase amorfa pero cristalizan en fases separadas durante el enfriamiento, es decir se observa una cristalización esferulítica para mezclas con pequeñas cantidades de uno de los dos componentes. Los cristales del componente menor se incluyen dentro de las esferulitas del componente principal, lo cual da lugar a un engrosamiento de la textura esferulítica. Se ha observado también que, a pesar de que cada componente de estas mezclas forma su propia fase cristalina, ambos componentes pueden cristalizar simultáneamente en todas las composiciones de

las mezclas (Dangseeyun, Nithitanakul, Suphanol y Thanomkiat, 2004, p. 677; Nadkarni y Rath, 2002, p. 838).

Yu y Ju (1997) observaron que para mezclas PET / PBT que poseen la misma composición y muestran una similar T_g , su cristalización puede cambiar con el tratamiento térmico prolongado y condiciones de mezclado. Algunas mezclas exhiben un único pico de cristalización y otras múltiples picos dependiendo de las condiciones experimentales (p. 92).

Según Avramova (1995), la dependencia de la T_g con la composición puede ser descrita con la ecuación de Fox:

$$\frac{1}{T_g} = \frac{W_{PET}}{T_{g_{PET}}} + \frac{(1 - W_{PET})}{T_{g_{PBT}}} \quad [1.5]$$

Donde:

W_{PET} = Fracción en peso de PET en la mezcla

T_g = Temperatura de transición vítrea

$T_{g_{PET}}$ = Temperatura de transición vítrea del PET puro

$T_{g_{PBT}}$ = Temperatura de transición vítrea del PBT puro

Las mezclas PET / PBT experimentan reacciones de transesterificación por encima de la temperatura de fusión lo cual promueve a la formación de copolímeros de bloque en la etapa inicial y finalmente copolímeros al azar (Ding et al., 2008, p. 1397).

La nucleación heterogénea que se lleva a cabo en estas mezclas ocasiona la existencia de un máximo en la velocidad de cristalización entre la temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea. La movilidad de las moléculas de PBT se incrementa mientras que la de las moléculas de PET disminuye a ciertas temperaturas de cristalización y provoca la reducción de la velocidad de cristalización de PBT en presencia de PET, el cual puede cristalizar mucho más

rápido debido a la mejora en su movilidad en presencia de PBT en comparación con el polímero puro (Androsch y Radusch, 2002, p. 909).

La estructura ordenada esferulítica de PBT y PET se mantiene a bajos contenidos del segundo componente en las mezclas, aunque las esferulitas se deforman y las más pequeñas son finalmente sustituidas por estructuras similares a barras a contenidos mayores de PET, como se evidencia por los pequeños patrones de dispersión del ángulo de la luz mostrados en la Figura 1.19 (Androsch y Radusch, 2002, p. 909)

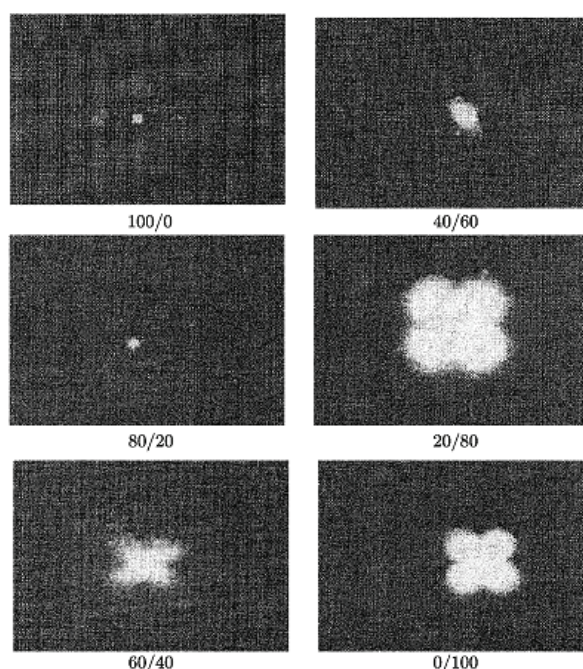


Figura 1.19. Angulo de dispersión de la luz en mezclas PBT/PET cristalizadas a 130 °C. La proporción en peso para cada mezcla se muestra en cada fotografía (Androsch y Radusch, 2002, p. 909)

- **Otras mezclas entre poliésteres y con algunos polímeros**

En la Tabla 1.7 se muestran algunas mezclas entre poliésteres y con otros polímeros.

1.1.4.5 Mezclas de Poliamidas

- **Mezclas entre poliamidas alifáticas**

Uno de los criterios que se han utilizado para la elaboración de mezclas de PA6 con otras poliamidas es el siguiente: Si un tipo de nylon puede ser totalmente disuelto en el monómero e-caprolactama y se obtiene una solución transparente homogénea, se cree que esta poliamida es miscible con el monómero. Si la solución obtenida es translúcida, el sistema es parcialmente miscible. Durante la polimerización por apertura de anillo, la composición química del PA6 es la misma que la e-caprolactama debido a que esta última contiene un grupo amida y no existe la liberación de otros grupos. Es por esta razón que se espera que si una poliamida es miscible con el monómero e-caprolactama, lo sea también con PA 6 (Li y Yang, 2004, p. 1715).

Al tomar en cuenta la consideración escrita anteriormente en la elaboración de mezclas PA6/PA66, se ha comprobado la miscibilidad y compatibilidad entre estos componentes. Se ha evidenciado una mejora en la resistencia al impacto de la PA6 sin disminuir la resistencia a la tracción, mediante la incorporación de una pequeña cantidad de PA 66 (2-10 % W/W). Esta última al ser insertada en la matriz de nylon 6, interfiere con el fin de disponer de los enlaces, lo cual provoca cambios en la estructura cristalina (Ellis, 1995, p. 273; Li y Yang, 2004, p. 1718)

En la Figura 1.20 se muestran micrografías de mezclas PA6/PA66 con diferentes porcentajes de PA66. Se puede apreciar que las mezclas preparadas por disolución de los componentes en un solvente tiene una morfología diferente a las preparadas con una extrusora, la misma que es similar a la PA6 pura.

La hilatura por fusión de mezclas de PA66, PA6-10, PA11, PA12 posibilita la obtención de fibras con propiedades mejoradas, aunque estas características dependen de las condiciones de procesamiento y morfología. La formación de mezclas compatibles puede originar transamidación entre los componentes; sin embargo este efecto es difícilmente detectado en mezclas donde los

Tabla 1.7 Mezclas de poliésteres termoplásticos

Mezcla	Miscibilidad/Compatibilización	Propiedades	Aplicaciones
PET / PC	Parcialmente miscible en estado fundido, compatibilización a través de transesterificación controlada o modificadores reactivos	Excelente tenacidad a bajas temperaturas, resistencia al calor y químicos, estabilidad dimensional	Piezas de automóviles: parachoques, telecomunicaciones: carcasas de radio, equipo al aire libre: cubiertas de tractores y consolas, artículos de deporte: botas de esquí y componentes de unión
PET / ABS	Inmiscible, compatibilización por modificadores reactivos	Alta resistencia al impacto, alta resistencia a la deformación por calor y resistencia a los químicos	Partes de automóviles y otras aplicaciones en competición con mezclas PC / ABS
PBT / PC	Inmiscible, compatibilización por modificadores reactivos o por transesterificación controlada	Resistencia al stress cracking en contacto con combustibles automotrices, excelente dureza a bajas temperaturas y estabilidad dimensional	Partes de automóviles: parachoques, paneles y similares aplicaciones a las de mezclas PET / PC
PBT / ABS	Inmiscible, compatibilización por modificadores reactivos	Alta resistencia al impacto, alta resistencia a la deformación por calor y resistencia a los químicos	Partes interiores de automóviles, artículos de cuidado personal: afeitadoras eléctricas, equipos de oficina y hogar
PET / HDPE	Inmiscible, compatibilización mediante compatibilizantes físicos o reactivos	Reciclaje y reuso de residuos de PET y HDPE	Inyección de piezas de paredes delgadas
PET / PP	Inmiscible, compatibilización mediante modificadores reactivos	Propiedades mecánicas mejoradas	Aplicaciones a nuevas fibras
PBT / PP	Inmiscible, compatibilización mediante modificadores reactivos	Propiedades eléctricas del PBT mejoradas	piezas eléctricas: enchufes y disyuntores

(Nadkarni y Rath, 2002; p. 882-885)

constituyentes son muy similares entre sí (Ellis, 1995, 274).

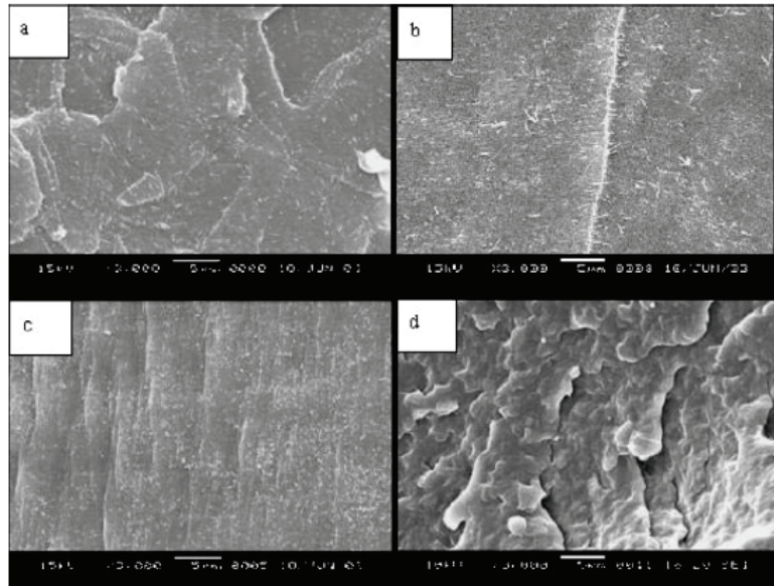


Figura 1.20. Micrografías de mezclas PA/PA66 que contienen a) 0 % PA66, b) 6 % PA66, c) 10 % PA66, d) 10 % PA66 (preparada por extrusión) (Li y Yang, 2004, 1717)

- **Mezclas de poliamidas con otros polímeros**

Mezclas PA/PP: Estos polímeros cristalinos son significativamente diferentes en su estructura y polaridad, por lo tanto no son miscibles. Las motivaciones principales para realizar estas mezclas están basadas en algunas ventajas como el costo y mejoras en la estabilidad dimensional en presencia de humedad. Aunque la compatibilización de estos materiales mediante el uso de anhídrido maleico se conoce desde hace mucho tiempo, el interés comercial en tales mezclas se ha desarrollado recientemente (Akkapeddi, 2002, p. 1069).

Mezclas PA/ABS: Las ventajas de esta mezcla son principalmente la resistencia al impacto y a la humedad. Dado que el ABS es un polímero amorfo, su resistencia al calor está limitada por la Tg de la fase de SAN, por lo tanto se esperaría que la mezcla muestre una menor resistencia al calor que la poliamida; sin embargo al utilizar el ABS como fase dispersa, la mezcla obtenida tendrá alto

punto de reblandecimiento (debido al alto punto de fusión de la poliamida) y alta resistencia a los solventes. Las mezclas simples de ABS y PA son altamente inmiscibles y por lo tanto son de poco valor práctico. Su compatibilización se lleva a cabo por varios métodos, la mayoría de las cuales implican modificación estructural del ABS (Akkapeddi, 2002, p. 1070).

Mezclas PA/PC: Policarbonato suele mezclarse con poliamidas comerciales (PA-66 y PA-6) con el fin de mejorar su resistencia a los solventes mientras se mantiene la resistencia al calor y tenacidad. Sin embargo, las mezclas simples de policarbonato y poliamidas son altamente incompatibles y por lo tanto no son útiles. Varios aditivos como resinas fenoxi, elastómeros poliéster-amida, copolímeros en bloques de polieteramida y poliamidapoliacrilato se han utilizado como compatibilizadores y modificaciones de impacto. A pesar de esto, las mezclas de poliamida / policarbonato no se han comercializado en ningún grado significativo todavía (Akkapeddi, 2002, p. 1078; Ellis, 1995, 279).

1.1.4.6 Mezclas de poliésteres y poliamidas

Las mezclas PET/PA6 son de gran interés debido a las propiedades individuales de cada uno de sus componentes. Aunque se ha observado que estas mezclas exhiben una pronunciada separación de sus fases, al procesarlas en forma de fibras poseen buenas propiedades, lo que las hace de gran importancia para el campo textil (Ellis, 1995, p. 279).

Uno de los objetivos primordiales que se busca alcanzar al mezclar PET con PA es remediar la pobre resistencia al impacto del PET para expandir sus potenciales aplicaciones. Los principales usos de estas mezclas se encuentran en piezas moldeadas huecas para automóviles que serán expuestas a altas temperaturas y productos químicos corrosivos durante su uso, colectores de admisión de combustible, de aspiración de aire y de extracción de humos que rodean el motor, entre otros (Nadkarni y Rath, 2002, p. 844).

Las mezclas de PET/PA6 son conocidas por ser inmiscibles a temperatura ambiente y, como tal muestran fragilidad a causa de una mala dispersión. Aunque poseen desventajas, son útiles para ciertas aplicaciones debido a que la poliamida que cristaliza más rápido actúa como un agente nucleante que mejora la velocidad de cristalización y el grado de cristalinidad del PET, lo que resulta en una mezcla con mayor módulo que además, permite la inyección de piezas en ciclos más cortos (Ellis, 1995, p. 280; Nadkarni y Rath, 2002, p. 844).

Se ha observado que cuando el PET se mezcla en PA6, éste último es el constituyente que cristaliza, esto se debe a que a las cadenas de PET actúan como núcleos para la formación de los cristales de la poliamida y de ese modo se altera la cinética de cristalización, morfología, y el grado de cristalinidad final. Se ha notado también que cuando el contenido de ambos componentes es comparable, se impide la formación de más cristales de poliamida debido a que se produce una máxima nucleación. (Dhar y Varma, 1997, p. 1123).

Las pruebas realizadas por DSC y DTA muestran que en las mezclas, la PA-6 y el PET funden a sus respectivas temperaturas de fusión, lo que indica que no se ha producido ninguna transesterificación. La mejora en las propiedades se debe a la morfología de la mezcla y a la cristalización de los dos componentes. Aunque no hay interacción química entre los constituyentes, las mejoras en las propiedades se deben a la capacidad de los materiales para permanecer en contacto molecular aún cuando las restricciones se imponen en la estructura (Dhar y Varma, 1997, p. 1123; Nadkarni y Rath, 2002, p. 845).

Mediante el uso de fotografías obtenidas por micrografía electrónica de barrido (SEM), algunas de las cuales se muestran en la Figura 1.21, se ha observado que en esta clase de mezclas en donde la matriz es la poliamida, a velocidades de cizallamiento bajas, el PET se encuentra en forma de esferas alargadas, mientras que a altas velocidades está en forma de barras (Dhar y Varma, 1997, p. 1123).

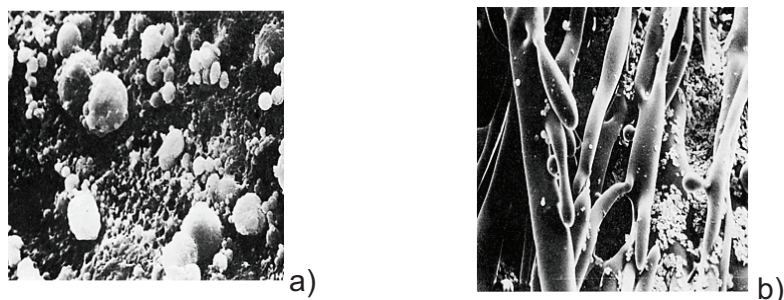


Figura 1.21. Micrografías de extruidos con diferentes velocidades de cizallamiento
Vistas longitudinales: mezcla 60/40 PA6 / PET, a) $5,8 \times 10^{-1} \times 7700$, (b) $1,15 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$
X 150
(Dhar y Varma, 1997, p. 1123)

En la Tabla 1.8 se muestra un resumen de las principales características de algunas mezclas entre poliésteres y poliamidas:

Tabla 1.8. Algunas mezclas entre poliésteres y poliamidas

MEZCLA	MISCIBILIDAD / COMPATIBILIZACIÓN	PROPIEDADES	APLICACIONES
PET / PA 6 o PA 66	Inmiscible, compatibilización a través de intercambio ester-amida controlado o reacciones de acoplamiento con modificadores reactivos	Altas propiedades mecánicas, resistencia al impacto, temperatura y a los químicos	Colectores de admisión de combustible, de aspiración de aire y de extracción de humos
PBT / PA 6 o PA 66	Inmiscible, compatibilización a través de modificadores reactivos	Similares a las de las mezclas PET/PA6 o PA66	Similares a las de las mezclas PET/PA6 o PA66
PBT / PAr	Miscible en estado fundido, compatibilización a través de transesterificación controlada	Excelente procesabilidad, alta HDT, resistencia al impacto y a la interperie	Carcasas de faros de atutomoviles, cascos de bomberos, claraboyas

(Nadkarni y Rath, 2002, p. 882-883)

1.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEZCLAS DE POLÍMEROS

1.2.1 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Es una técnica termoanalítica en la cual se mide la diferencia de flujo de calor o potencia entre un material de referencia y una muestra, que ha sido expuesta a determinado programa de temperatura (Haines, Reading y Wilburn, 1998, p. 285).

La representación gráfica del proceso de medición es la curva DSC o termograma, en la cual se muestra la variación del flujo de calor en función de la temperatura. En la Figura 1.22 se puede observar las diferentes transiciones térmicas que se llevan a cabo en el análisis DSC de un material polimérico (Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 1)

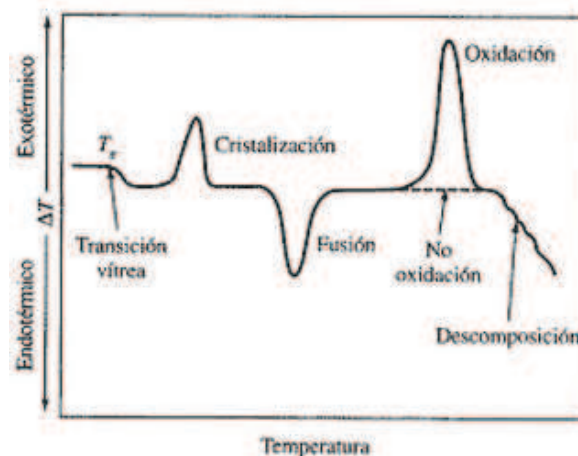


Figura 1.22. Esquema de un termograma que muestra las transiciones térmicas encontradas en materiales poliméricos (Herman, 2004, p. 12)

El equipo a utilizarse es un Calorímetro Diferencial de Barrido, el cual puede ser de diferentes tipos con relación al método de medición usado (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p. 2).

1.2.1.1 Transiciones térmicas en polímeros y sus mezclas

a) Transición vítrea (T_g)

En polímeros amorfos o semicristalinos, la temperatura de transición vítrea (T_g) establece esencialmente el cambio de un estado rígido y frágil a un estado flexible. A temperaturas inferiores a la T_g , los movimientos moleculares están “congelados” y la variación de la capacidad calorífica con la temperatura se da en forma lineal. Al llegar a la transición vítrea, comienzan a tener lugar movimientos de segmentos de las cadenas del polímero, se da lugar un cambio brusco en la capacidad calorífica y aumenta el volumen libre, lo que hace que el material se vuelva blando (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p. 7).

Desde el punto de vista termodinámico, la transición vítrea se considera como una transición de segundo orden debido a que no lleva asociado ningún cambio de fase. Durante esta transición, es la segunda derivada de la función característica termodinámica, la energía libre de Gibbs, la que sufre un cambio (McKenna y Simon, 2002, p. 51).

Los factores más importantes que determinan el valor de la temperatura de transición vítrea son la flexibilidad de la cadena polimérica y las interacciones entre tales cadenas. La forma y la posición de la T_g dependen de la morfología del polímero lo que a su vez está en función de las condiciones empleadas para su procesamiento (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p. 7).

En la Figura 1.23 se observa un ejemplo de evaluación de la temperatura de transición vítrea según la norma ASTM D3418-08:

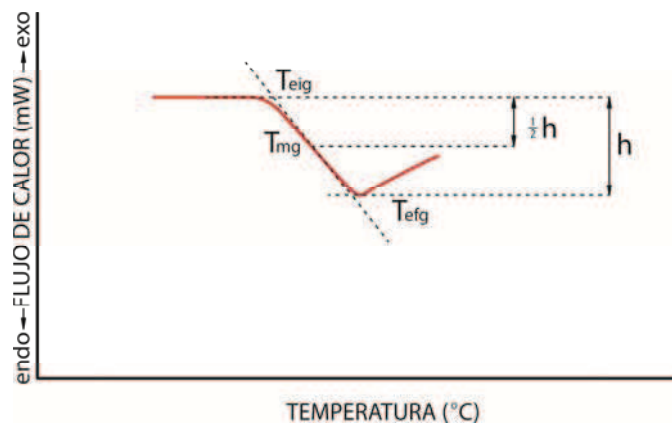


Figura 1.23. Evaluación de la temperatura de transición vítrea para el polimetilmetacrilato (PMMA)
(ASTM-D3418, 2008, p. 4)

Donde:

T_{eig} = Temperatura onset extrapolada

T_{mg} = Temperatura media; Temperatura de transición vítrea

T_{efg} = Temperatura final extrapolada

En el caso de mezclas de polímeros, si ésta es **miscible**, se tendrá una temperatura de transición vítrea intermedia entre las de los polímeros componentes, caso contrario aparecen dos temperaturas de transición vítrea correspondientes a los dos polímeros en la mezcla. En la Figura 1.24 (a) se muestra los termogramas de una familia de mezclas miscibles. La existencia de una sola T_g en función de la composición indica miscibilidad entre sus componentes. En la Figura 1.24 (b) aparecen dos transiciones vítreas que toman siempre el mismo valor independientemente de la composición de la mezcla lo que muestra la inmiscibilidad de los constituyentes (Calhoun y Peacock, 2006, p.188).

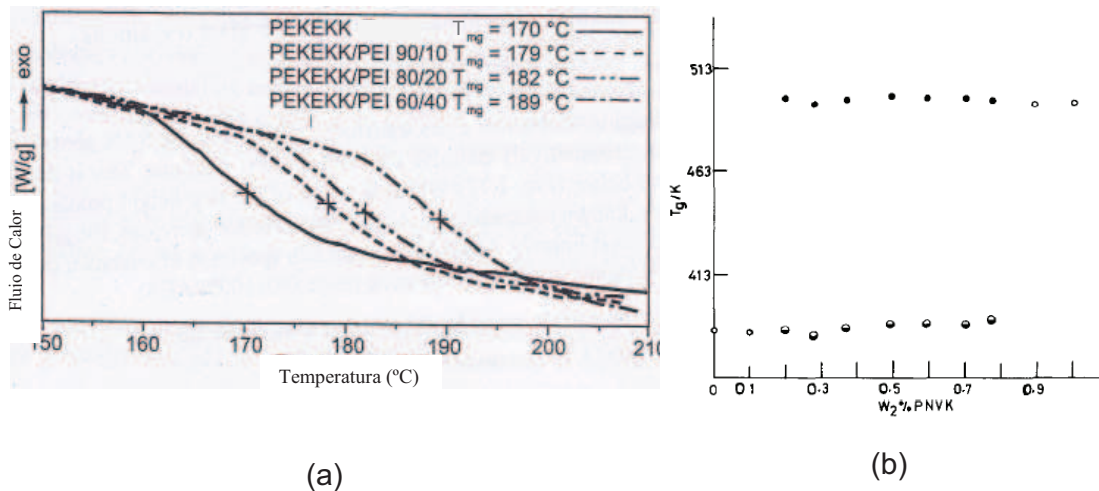


Figura 1.24. (a) Termogramas DSC de mezclas de poli (éter cetona éter cetona cetona) (PEKEKK) con diferentes cantidades de polietilenimina (PEI), (b) Temperatura de transición vítrea en función de la composición de la mezcla Poli (metil metacrilato) (PMMA) con poli (N-vinilcarbazol) (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p. 86; Katime y Rego, 1990, p. 217)

b) Fusión y calor de fusión

En la fusión se lleva a cabo el cambio desde un estado sólido y cristalino a un estado de líquido amorfo. Los polímeros semicristalinos están formados por cristales de diferente espesor lamelar y grado de perfección, los cuales se funden en su totalidad en un rango relativamente amplio de temperatura. La Figura 1.25 muestra la curva endotérmica de esta transición de primer orden, en la que se observa la no uniformidad de la estructura de los cristales que componen un polímero (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, pp. 10-12).

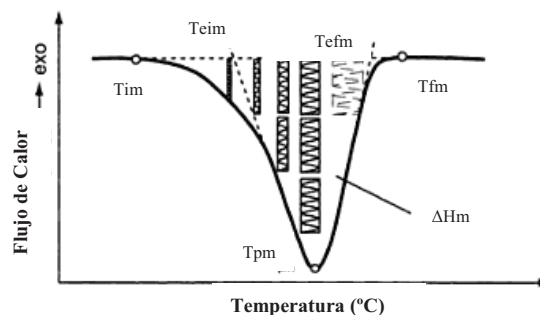


Figura 1.25. Curva de fusión y distribución de espesor lamelar para un termoplástico semicristalino (Ehrenstein et al., 2004, p. 12)

Donde:

T_{im} = Temperatura onset de fusión

T_{eim} = Temperatura onset de fusión extrapolada

T_{pm} = Temperatura de pico de fusión

T_{fm} = Temperatura final de fusión

T_{efm} = Temperatura final de fusión extrapolada

ΔH_m = Calor de fusión

La mayoría de las curvas DSC de las mezclas de dos componentes semicristalinos contienen dos picos de fusión debido a las diferentes formas de cristalización de los componentes presentes, tal como se muestra en la Figura 1.26 (Ehrenstein et al., 2004, p.88):

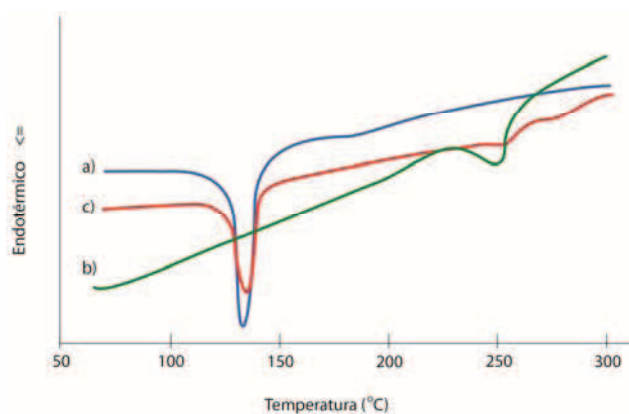


Figura 1.26. Curvas de calentamiento de a) HDPE, b) PET y c) mezcla 70/30 HDPE-PET (Brandalise, Mauler y Zeni, 2012, p. 3)

El calor de fusión es la energía necesaria para fundir la fracción cristalina de un polímero y se calcula mediante el área delimitada por la curva DSC y la línea que une las temperaturas onset y final de fusión (Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 74).

La cristalinidad de un polímero puede ser calculada mediante la Ecuación 1.8 (Scheirs, 2000):

$$\% \text{ cristalinidad} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \quad [1.6]$$

Donde:

ΔH_m = Calor de fusión de la muestra

ΔH_m^0 = Calor de fusión del polímero 100% cristalino (valor bibliográfico)

c) Cristalización

El enfriamiento sucesivo de un polímero después de haber sido fundido, revela el proceso de cristalización, en el cual se da un cambio en la entalpía que se lleva a cabo cuando el material en estado de líquido amorfo es transformado en sólido cristalino (Ehrenstein et al., 2004, p. 16; Mano, 2003, p. 162).

Por encima de la T_g , las cadenas del polímero aumentan su movilidad, lo que origina la formación de estructuras cristalinas que son termodinámicamente más estables. La **cristalización en frío** se refiere a la cristalización que se lleva a cabo durante el calentamiento de un material desde una temperatura por debajo de su T_g . Este proceso es diferente al de la cristalización fundida, donde el material cristaliza por debajo de su temperatura de fusión y por encima de su transición vítrea durante el enfriamiento (Mano, 2003, p. 162).

En la Figura 1.27 se muestra la curva característica de cristalización en la cual la presencia del pico exotérmico indica la liberación de calor durante el proceso:

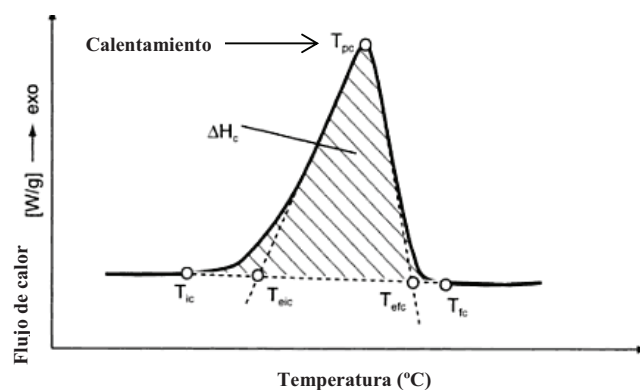


Figura 1.27. Curva característica de cristalización (Ehrenstein et al., 2004, p. 20)

1.2.1.2 Factores que afectan en la medición de las transiciones térmicas

Calibración: Al realizar una medición, los valores de temperatura y entalpía registrados por el equipo DSC difieren de los valores reales. Esta diferencia se corrige mediante la calibración, la misma que debe realizarse bajo las mismas condiciones a las que se efectúen los análisis de los materiales de prueba para lo cual se utilizan al menos dos estándares de referencia cuyas transiciones térmicas se lleven a cabo a lo largo de todo el rango de trabajo y cuya pureza sea mayor al 99% (Ehrenstein et al., 2004, p. 22; Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 28).

Velocidad de calentamiento: La velocidad de calentamiento tiene una gran influencia no solamente en la duración del experimento sino también en los resultados, la selección de la misma depende de la transición a ser medida. Altas velocidades de calentamiento generan una mayor señal lo que facilita la determinación de pequeñas transiciones como la transición vítrea; por otro lado bajas velocidades mejoran la resolución, lo que permite una clara definición de los picos endotérmicos y exotérmicos en el termograma. Es importante mencionar que la tasa de enfriamiento deberá ser la misma usada para el calentamiento y de esto dependerá la nueva historia térmica del material (Ehrenstein et al., 2004, pp. 50-53).

Rango de temperaturas: Con el propósito de determinar todas las transiciones térmicas de una muestra mediante el análisis de la curva DSC, la temperatura inicial de ensayo será al menos 50 °C por debajo de la primera transición esperada con el fin de obtener una línea base estable que facilite la evaluación. La temperatura final deberá ser lo suficientemente alta para conseguir la fusión total del material sin que ocurra la descomposición térmica, por lo que en la práctica se sugiere que ésta sea 30 °C sobre la temperatura de fusión (Ehrenstein et al., 2004, p. 50).

Masa de la muestra: La masa de la muestra tiene gran influencia en la señal del flujo de calor. Cuando se trata de determinar una transición de primer orden a una tasa de 10 °C/min, se utiliza una muestra de 5 a 10 mg. Si se utiliza una masa

demasiado grande, existe la posibilidad de que el fundido se escape de la celda contenedora y se origine una inestabilidad en la línea base después de la fusión, además se puede producir un ensanchamiento del pico de fusión y un desplazamiento del mismo debido al retraso en la conducción del calor. Masas de muestra entre 10 y 20 mg son aconsejables para la determinación de transiciones vítreas (Ehrenstein et al., 2004, p. 42; Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 37).

Empaquetamiento de la muestra: La muestra debe tener un buen contacto con la celda que la contiene para optimizar el flujo con la fuente de calor. Como se muestra en la Figura 1.28, es necesario que la celda esté sellada para minimizar los espacios entre las partículas de la muestra, debido a que la conductividad térmica del aire es generalmente muy baja en comparación con la muestra. Si la forma de la muestra no es regular, puede deformarse durante el calentamiento, aumentando el nivel de ruido de la línea de base. Este ruido es a menudo suficientemente grande como para ser confundido con un pico de transición (Hatakeyama y Quinn, 1999, p. 38).

Los tipos de celdas disponibles difieren en material, volumen y uso. Las celdas de aluminio son los más usadas para el análisis de plásticos hasta temperaturas de 600 °C debido a que no reaccionan con la muestra durante el ensayo (Ehrenstein et al., 2004, p. 45).



Figura 1.28. Celda para ensayo DSC antes y después del encapsulamiento (Universidad Oldenburg Carl von Ossietzky, 2006)

Generalmente, se usa una celda vacía como referencia en el calorímetro. Los materiales de referencia suelen usarse cuando las transiciones térmicas son muy

pequeñas y la masa de la muestra no puede ser incrementada por el alto contenido de cargas (Ehrenstein et al., 2004, p. 47).

Gas de purga: A fin de prevenir las reacciones de oxidación que podrían darse al contacto de la muestra con el entorno, los ensayos DSC deben realizarse en una atmósfera inerte por medio de la utilización de un gas de alta pureza (99,999 %) que debe fluir sobre el sistema analizado durante toda la ejecución del experimento. Además, en ausencia de una atmósfera inerte, ciertos plásticos se descomponen al fundirse, lo que ocasiona la emisión de gases que originan una contrapresión y como consecuencia una alteración en los resultados (Ehrenstein et al., 2004, p. 48; Haines et al., 1998, p. 299).

El nitrógeno es frecuentemente usado para rangos desde temperatura ambiente hasta los 600 °C, por otro lado el helio es utilizado para ensayos a bajas temperaturas a causa de su buena conductividad térmica (Ehrenstein et al., 2004, p. 47).

1.2.1.3 Número de Barridos

Primer barrido: Permite obtener información sobre la condición actual de la muestra: condiciones de procesamiento, cristalinidad, etc. Al terminar el primer barrido, se habrá logrado un buen contacto entre la muestra y la celda que la contiene y mediante un enfriamiento controlado permitirá crear una nueva historia térmica del material (Ehrenstein et al., 2004, p. 34).

Segundo barrido: Los datos obtenidos de este análisis son usados para determinar las características propias de un material. Al igual que al terminar el primer barrido, se debe realizar un enfriamiento controlado (Ehrenstein et al., 2004, p. 34).

Tercer barrido.- Permite validar los resultados obtenidos del segundo calentamiento en especial cuando se trabaja con resinas de bajo grado de curado (Ehrenstein et al., 2004, p. 34).

1.2.1.4 Evaluación

Al terminar el ensayo DSC mediante el uso de condiciones experimentales favorables, las transiciones térmicas deben ser evaluadas e interpretadas, para lo cual se requiere un conocimiento detallado del material, condiciones de procesamiento y preparación de la muestra (Ehrenstein et al., 2004, p. 34).

Evaluación de la temperatura de transición vítrea: Como se aprecia en la Figura 1.29, existen diversas formas de evaluar la T_g en el termograma, las cuales dependen principalmente del software del equipo utilizado para el ensayo (Ehrenstein et al., 2004, p. 58).

Si la línea base antes y después de la transición vítrea es estable, los cuatro métodos llevarán a una misma respuesta; sin embargo, la inestabilidad de la línea base dificulta el trazo de una tangente, razón por la cual el método de la temperatura del punto medio es la forma de evaluación recomendada en los estándares actuales (Ehrenstein et al., 2004, p. 58).

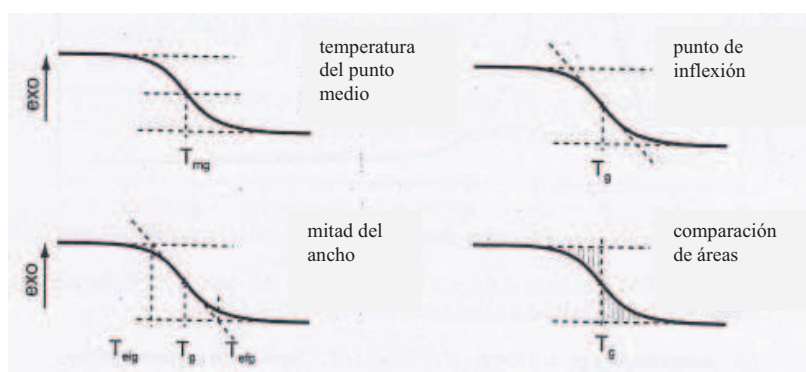


Figura 1.29. Diferentes formas de evaluar la transición vítrea (Ehrenstein et al., 2004, p. 58)

Otra forma de determinar la temperatura de transición vítrea es mediante la primera derivada de la curva DSC en función del tiempo o temperatura, la cual es generalmente calculada mediante el uso de un software. Como se muestra en la Figura 1.30, al detectarse una transición vítrea, la derivada presentará un pico cuya área es proporcional a la variación de la capacidad calorífica (ΔC_p) (Haines et al., 1998, p. 287).

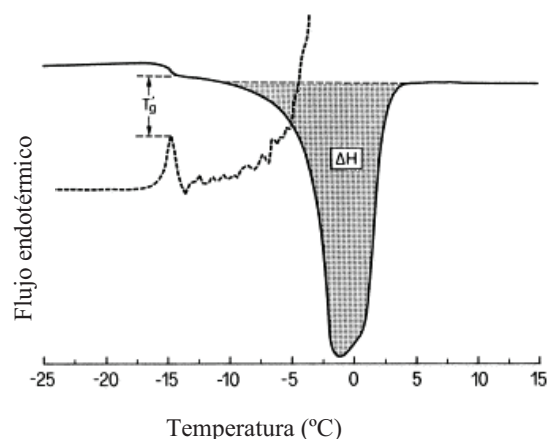


Figura 1.30. Típica curva DSC y su primera derivada que muestra la T_g de un hidrolizado de almidón acuoso 20% (w / v) (Arvanitoyannis, Biliaderisa y Swanb, 1999, p. 540)

Evaluación del punto de fusión y calor de fusión: Al evaluar el calor de fusión, las líneas base antes y después de la transición son unidas mediante una línea recta. Las líneas base curvas no son utilizadas con frecuencia para la integración y más bien son empleadas en ensayos de evaporación de sustancias volátiles y reacciones químicas. En la Figura 1.31, se observa los dos tipos de líneas usadas para la determinación del calor de fusión (Ehrenstein et al., 2004, p. 60)

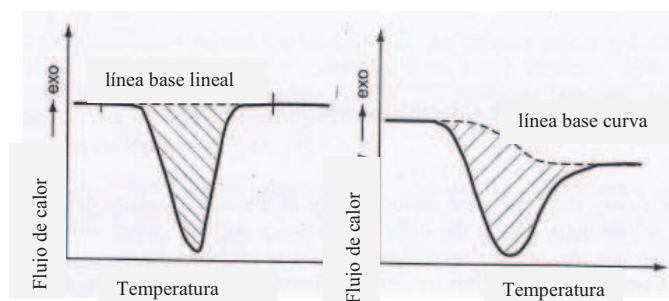


Figura 1.31. Dibujo esquemático de los diferentes tipos de línea base (lineal y curva) para la determinación del calor de fusión (Ehrenstein et al., 2004, p. 60)

El tipo de línea base no afecta a la determinación de la temperatura del pico de fusión. En cambio el cálculo experimental del calor de fusión, depende fuertemente del tipo de línea base seleccionada. Si la curva DSC no tiene una forma ideal (como el tipo (a) de la Figura 1.31), pueden existir diferencias mayores al 30 % en la entalpía para una misma medida (Ehrenstein et al., 2004, p. 60).

1.2.2 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (FTIR)

1.2.2.1 Generalidades

La espectroscopía de infrarrojo es probablemente el método más empleado para la caracterización de polímeros. Entre los principales usos se incluyen los siguientes (Scheirs, 2000):

- Identificación de polímeros y sus mezclas
- Determinación de nivel de ramificaciones y grupos terminales
- Valoración del grado de degradación de polímeros
- Determinación de cristalinidad
- Grado de curado

Como se puede observar en la Figura 1.32, el análisis FTIR se lleva a cabo en la región del infrarrojo medio, cuya longitud de onda está entre los 4000 a 400 cm^{-1} . Cuando la radiación infrarroja interactúa con la materia, ésta es absorbida y origina una vibración de los enlaces químicos. Los grupos funcionales absorben la radiación infrarroja siempre en el mismo número de onda sin importar la estructura del resto de la molécula a la que pertenezcan, lo cual indica la correlación entre el número de onda a la cual la molécula absorbe la radiación infrarroja y su estructura (Smith, 2011, p. 5).

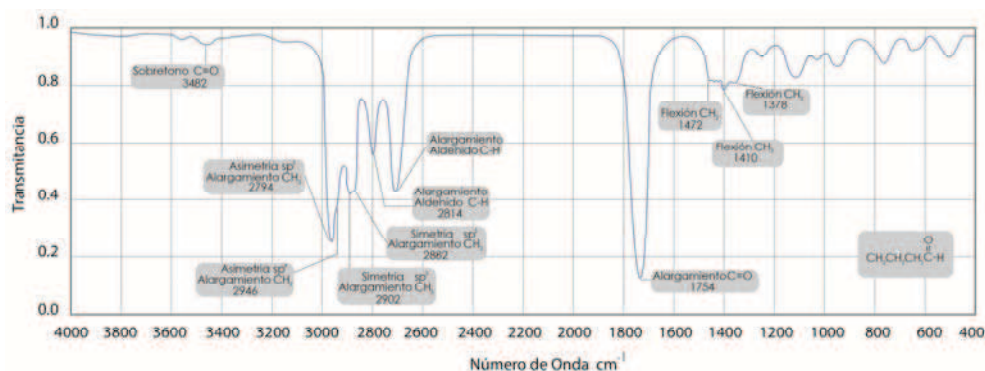


Figura 1.32. Espectro infrarrojo del n-butanal con sus respectivas vibraciones moleculares y bandas
(Crouch, Holler, Skoog y West, 2005, p. 823)

1.2.2.2 Principales técnicas de FTIR

Análisis por transmisión: Es el método más simple y el más usado para el análisis FTIR de polímeros para lo cual, se requiere que la muestra sea reducida a películas muy delgadas de modo que pueda penetrar y traspasar fácilmente el haz de luz.

Análisis por reflectancia total atenuada (ATR): Es la técnica más usada para el análisis de polímeros que no pueden ser sometidos a moldeo por compresión pero son flexibles, lisos y planos (Scheirs, 2000, p. 73).

Para el análisis ATR se requiere el uso de un cristal sobre el cuál se sujeta la muestra con un accesorio. Como se observa en la Figura 1.33, el haz de luz IR atraviesa el cristal con un ángulo de refracción mayor al de la muestra y al alcanzar la superficie de contacto entre ambos, si el ángulo de incidencia es lo suficientemente grande, toda la luz se reflejará desde la superficie interna del cristal. Si no existe un buen contacto entre la muestra y el cristal, las bandas de absorción de alta frecuencia mostrarán una intensidad reducida (Scheirs, 2000, p. 73; Smith, 2011, p. 120).

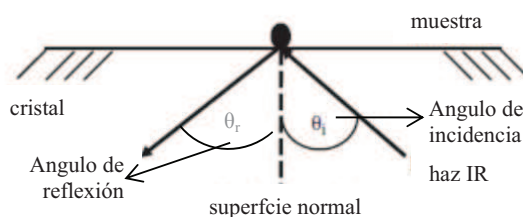


Figura 1.33. Esquema de reflectancia total
(Smith, 2011, p. 120)

1.3 RECICLAJE DE POLIÉSTERES Y POLIAMIDAS

1.3.1 RECICLAJE DE POLIÉSTERES

1.3.1.1 Introducción

La industria del reciclaje del PET, cuyos inicios se remontan al año 1977, se originó como resultado de la necesidad de mejorar la gestión de residuos debido a la baja tasa de descomposición natural de este material. Por otra parte tecnologías nuevas y más baratas dan un valor añadido a esta actividad, la cual proporciona un producto con costos relativamente más bajos (Awaja y Pavel, 2005, p. 1458).

Muchos investigadores afirman que, con el fin de lograr un proceso exitoso, las escamas de PET deben cumplir con ciertos requisitos mínimos (Hirao y Nakatani, 2011, p. 232). Algunos valores referenciales se muestran en la Tabla 1.9.

1.3.1.2 Contaminantes presentes en el proceso de reciclaje del PET

La contaminación del PET es la causa principal de deterioro de sus propiedades físicas y químicas durante el reprocesamiento, mientras menor sea la cantidad presente de estos agentes, mejor será la calidad del producto obtenido (Welle, 2011, p. 867). Algunos contaminantes comunes son los siguientes:

Tabla 1.9. Requerimientos mínimos para el reprocesamiento de PET reciclado

PROPIEDAD	VALOR
Viscosidad intrínseca	>0,7 dl g ⁻¹
Contenido de agua	<0,05 % (w/w)
Punto de fusión	>240°C
Tamaño de hojuela	0,4 mm <D<8 mm
Contenido de colorantes	<10 ppm
Índice de amarillamiento	<20
Contenido de metales	<3 ppm
Contenido de PVC	<50 ppm
Contenido de poliolefinas	<10 ppm

(Awaja y Pavel, 2005, p. 1458).

Etiquetas: La mayoría de los ácidos nocivos para el proceso de reciclaje del PET son el ácido acético, que es producido por poli (viniletilo), ácido de colofonia y ácido abiético, que se originan de la descomposición de adhesivos y ácido clorhídrico que es producido por el PVC. Los ácidos actúan como catalizadores para las reacciones de escisión de la cadena durante la fusión del PET, mientras que la presencia de PVC (100 ppm) puede provocar la presencia de salpicaduras negras e inclusive su degradación. Además, las etiquetas impresas hacen que colores no deseados aparezcan durante el procesamiento (Awaja y Pavel, 2005, p. 1458; Cadena y Quiroz, 2000, p. 66).

Agua: El agua reduce el peso molecular del PET a través de una reacción de hidrólisis. La mayoría del contenido de agua proviene del lavado de escamas y debe reducirse sustancialmente mediante secado apropiado hasta un valor inferior a 0,05 % para evitar la degradación (Spychaj, 2002, p. 1266).

Otros contaminantes: El uso de botellas de PET para almacenar sustancias tales como detergentes, combustibles, pesticidas, podría ser un peligro para la salud, si los restos de estas sustancias permanecen en el reciclado. También, un subproducto de las reacciones de degradación del PET es el acetaldehído, cuya migración a los productos alimenticios que contienen los recipientes elaborados con material reprocesado, era una preocupación importante en las primeras

etapas del desarrollo del proceso de reciclaje; sin embargo, la alta volatilidad del acetaldehído hace posible que pueda ser minimizado mediante el procesamiento al vacío o por secado, además del uso de estabilizadores tales como 4-aminobenzoico-difenilamina y 4,5 -ácido dihidroxibenzoico (Awaja y Pavel, 2005, p. 1458; Burnley, Chilton, y Nesaratnam, 2010, p. 1241).

1.3.1.3 Procesos de reciclaje convencionales del PET

Reciclado químico: Con el reciclado químico (quimiólisis) del PET se obtiene despolimerización total en monómeros o despolimerización parcial en oligómeros. Los productos químicos utilizados para la despolimerización incluyen agua (hidrólisis), metanol (metanólisis) y etilenglicol (glicólisis). La principal desventaja de la quimiólisis es su alto costo (Nadkarni, 2002, p. 1235-1245).

Reciclado Mecánico: El reciclado mecánico del PET normalmente consiste en la eliminación de los contaminantes por clasificación, lavado, secado y procesamiento en estado fundido (Cadena y Quiroz, 2000, p. 55).

La eliminación de los contaminantes del PET es un paso vital en el reciclado mecánico, en el cual intervienen varios procesos (Welle, 2011, p.870):

- Separación de las botellas de PET de PVC, polietileno y otros plásticos, operación que se puede realizar manualmente aunque, una separación eficiente se puede lograr utilizando métodos basados en diferencia de densidades
- Molienda del material reciclado, la cual facilita el procesamiento posterior
- Lavado
- Procesamiento en estado fundido, para lo cual se suele utilizar un sistema de extrusión

La principal ventaja del reciclado mecánico radica en que es un proceso relativamente simple, amigable con el ambiente y requiere poca inversión. Entre

las desventajas se encuentra la reducción del peso molecular durante el procesamiento (Awaja y Pavel, 2005, p. 1459).

1.3.1.4 Aumento de la viscosidad intrínseca de PET reciclado

El PET es susceptible a experimentar una caída de su peso molecular cuando se lo procesa en un sistema de extrusión normal. Las reacciones de degradación térmica e hidrolíticas durante la fusión son responsables de esta reducción, para contrarrestar estos efectos, se utilizan las siguientes técnicas (Karger-Kocsis, 2002, p. 1292):

Reprocesamiento al vacío: Las unidades recientes de reciclaje de PET están equipadas con sistemas de vacío. Todas las sustancias volátiles presentes o que se han producido durante el procesamiento incluido el vapor de agua, se eliminan constantemente durante el proceso. La desgasificación al vacío fue presentada por Erema en sus sistemas de reciclaje para minimizar el efecto de las reacciones de degradación, lo que da como resultado un mejor producto (Awaja y Pavel, 2005, p. 1461).

Estabilizadores: Estas sustancias tienen principalmente la función de reducir el efecto de la contaminación con PVC y también promueven la estabilización térmica. La mayoría de los estabilizadores de proceso son a base de metales como Sn y Sb. La adición de fosfato orgánico al PET durante el re-procesamiento ayuda a estabilizarlo mediante la descomposición de los grupos de hidroperóxido, además la adición de sustancias como (2,4, di-terbutilfenil) pentaeritritol difosfito puede prevenir la pérdida del peso molecular, inhibe reacciones de amarillamiento y añade un valor agregado al proceso de reciclaje de PET (Spychaj, 2002, p. 1264).

Extendedores de cadena: La extensión de la cadena del PET es un proceso donde se hace reaccionar un material di o polifuncional de bajo peso molecular

con los grupos terminales carboxilo y/o hidroxilo del PET, para incorporarse a las cadenas que han sufrido una escisión (Awaja et al., 2004, p. 866).

El mecanismo de la reacción de extensión de la cadena de PET fue presentado por Inata y Matsumura quienes sugirieron que, para un extensor de cadena de 2,20-bis (2-oxazolona) hay tres tipos de reacciones (Awaja y Pavel, 2005, p. 1462):

- Reacción de bloqueo donde una molécula del extensor de cadena reacciona con una cadena de PET
- Reacción de acoplamiento, donde una molécula de cadena se une a dos cadenas de PET.
- Inhibición en la molécula del extendedor de cadena

La reacción de bloqueo es un paso inicial para el acoplamiento, las reacciones y sus velocidades están reguladas por las condiciones y la concentración del extendedor de cadena (Karger-Kocsis, 2002, p. 1293).

1.3.2 RECICLAJE DE POLIAMIDAS

El bajo índice de contaminación proveniente de las poliamidas se debe principalmente a su reciclaje. Se han realizado muchos esfuerzos para disminuir el desperdicio en operaciones tales como el moldeo e inyección mediante la mezcla del material molido con la resina virgen (Boydell, Watson y Williams, 1995, p. 351).

La mayoría de poliamidas poseen muy buena estabilidad en estado fundido y mantienen su peso molecular y propiedades mecánicas aun después de algunos reprocesamientos, siempre y cuando se haga un correcto control de la humedad y contaminación (Bertilsso et al., 2002, p. 2535).

El reciclaje mecánico, que consiste en la granulación y fusión de la poliamida seca, ha mostrado ser un proceso versátil debido a la estabilidad térmica del

material; sin embargo, se ha determinado que mediante este proceso hay un descenso de un 30 % en la resistencia al impacto y de 10 % en la rigidez (Boydell et al., 1995, p. 351; Curto, La Mantia y Scaffaro, 2002, p. 1899).

El reciclaje químico se usa principalmente para residuos de fibra y tiene como finalidad la obtención de un monómero. En el caso de la PA6, las fibras son calentadas a 300 °C en presencia de ácido fosfórico y la e-caprolactama se desprende en forma de vapor sobrecalentado. Otra aplicación frecuente es la conversión de PA66 en ácido adípico y hexametilén diamina por hidrólisis ácida o básica (Boydell et al., 1995, p. 352).

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PUROS

En el presente trabajo se utilizaron dos poliésteres y una poliamida, las cuales fueron seleccionadas de acuerdo a los siguientes criterios:

Según datos del Banco Central del Ecuador (2012), el PET es el poliéster de mayor demanda debido a sus múltiples aplicaciones, sobre todo en el campo de los envases y el de las fibras textiles. En el año 2012, el 90 % del total de importaciones de poliésteres correspondieron a este material y el 3 % fueron de otras materias primas como el PBT. En el caso de las poliamidas, más del 99 % de las importaciones fueron de PA6, lo cual se justifica por su elevado uso en el campo textil.

Por lo explicado anteriormente, se seleccionaron dos tipos de PET, uno de grado inyección que es el que se utiliza para la elaboración de botellas y el otro de grado extrusión que se emplea en fibras y, de igual forma, la PA6 que se empleó fue de grado extrusión. Los materiales fueron proporcionados en forma de granza, por diferentes casas comerciales y para su identificación, se utilizó la nomenclatura que se muestra en la Tabla 2.1

Tabla 2.1. Materiales puros utilizados en el estudio

MATERIAL	NOMENCLATURA
Poli (etilén tereftalato) (PET) grado inyección, marca comercial JADE	PETb
Poli (etilén tereftalato) (PET) grado extrusión, marca comercial CHEMTECH	PETe
Poli (butilén tereftalato) (PBT) con 15% fibra de vidrio grado inyección, marca comercial BIPEX	PBT
Poliamida 6 (PA6) grado extrusión, marca comercial CHEMTECH	PA6

Las hojas técnicas de los materiales estudiados se encuentran en el Anexo I.

Los materiales puros fueron caracterizados mediante las técnicas que se detallan a continuación:

- **Espectroscopía de infrarrojo**, por medio de la cual se comprobó si los poliésteres y poliamidas proporcionados por las casas comerciales correspondían a los requeridos para el estudio, a través del análisis de sus grupos funcionales.
- **Determinación de la densidad**, con lo cual se verificaron los datos bibliográficos y se determinó la masa a utilizarse de cada uno de los componentes en las mezclas.
- **Calorimetría diferencial de barrido (DSC)**, para la obtención de termogramas mediante los cuales se determinó la temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión, temperatura y porcentaje de cristalización.
- **Contenido de cenizas**, mediante la cual se cuantificó el porcentaje de cargas presentes en cada uno de los materiales a utilizarse.

2.1.1 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (FTIR)

2.1.1.1 Preparación de las muestras

Para la obtención de los espectros se utilizó la técnica de transmitancia, para lo cual se tomó alrededor de 0,5 g de cada material puro y se los prensó en medio de dos placas antiadherentes con el fin de obtener una delgada lámina. Se utilizó para el efecto la prensa Carver Modelo 2112-2 y las condiciones a las cuales se operó el equipo se indican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Condiciones de operación de la prensa para la obtención de láminas delgadas

Temperatura (°C)	250
Presión (psi)	20 000
Tiempo (min)	0,5

2.1.1.2 Obtención y análisis de espectros

Las láminas obtenidas fueron analizadas por transmitancia desde los 4 000 hasta los 450 cm^{-1} con el espectrofotómetro de infrarrojo Perkin Elmer modelo Spectrum One perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP). Se siguió el procedimiento detallado en Zambrano (2008), para lo cual se realizaron nueve barridos por muestra y mediante el software del equipo se realizó una normalización, suavizado de los picos y corrección de la línea base con el fin de obtener espectros de buena resolución (p. 67).

2.1.2 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

Se siguió el método A detallado en la norma ASTM D792-08. Se realizaron tres determinaciones de densidad para cada material mediante el uso de la balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200, 200,0000 g, 0,0001 g y el accesorio para la determinación de densidades para balanzas AG Mettler Toledo, el cual se muestra en la Figura 2.1. Se empleó agua destilada como líquido de inmersión para cada determinación.

Los datos experimentales para la determinación de la densidad se encuentran en el Anexo II.



Figura 2.1. Accesorio para determinación de densidades AG Mettler Toledo

2.1.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS

Para determinar el contenido de inorgánicos presentes en cada uno de los materiales puros, se utilizaron crisoles de 50 mL sin tapa, los cuales fueron lavados, secados y tarados en una mufla durante 15 minutos a 500 °C. Posteriormente fueron colocados en un desecador para evitar que su peso sea alterado por la humedad del ambiente.

La muestra pesada fue colocada en los crisoles y se siguió en el método detallado en la norma ASTM D5630-08. Los pesos de las muestras y crisoles, se encuentran en el Anexo III.

Los equipos utilizados en los ensayos fueron los siguientes:

- Balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200, 200,0000 g, 0,0001 g
- Mufla Vulcan A-130, 1100 °C, 50 °C
- Sorbona Labconco

2.1.4 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS

Para la determinación de las propiedades térmicas de los materiales puros en estudio se utilizaron los siguientes equipos:

- Calorímetro diferencial de barrido Netzsch, modelo DSC 204 F1 Phoenix, el cual dispone de un intracooler para el enfriamiento a velocidad constante
- Calorímetro diferencial de barrido Shimadzu modelo DSC 50, que permite la realización de pruebas desde la temperatura ambiente el cual posee un ventilador para el enfriamiento y un baño térmico Haake 000-5744 con termostato para enfriamiento de agua de refrigeración
- Balanza analítica Shimadzu modelo Libror AEL-40SM, 42,00000 g, 0,00001 g
- Prensa Netzsch para sellar celdas
- Celdas de aluminio Netzsch 25 μ L

En la Figura 2.2 se muestra un esquema de los calorímetros utilizados.

Nota: Es muy importante indicar que inicialmente el calorímetro Netzsch iba a emplearse para todos los ensayos térmicos; sin embargo, un daño en el sensor de temperatura del mismo hizo que fuera imposible seguir utilizándolo, razón por la cual se tuvo que repotenciar el calorímetro Shimadzu.

2.1.4.1 Limpieza del horno de los calorímetros

Para evitar que las mediciones se vean afectadas por impurezas presentes en la superficie de los hornos provenientes de las muestras o del contacto con el ambiente, se procedió a realizar una limpieza de los mismos, para lo cual se siguió el procedimiento detallado a continuación:



Figura 2.2. Calorímetros Diferenciales de Barrido utilizados para los ensayos: superior-Netzsch, inferior-Shimadzu

- Se retiraron las celdas de aluminio que se encontraban en el interior de los hornos
- Por medio del software que disponen los equipos, se fijó el flujo de nitrógeno en 20 mL y la temperatura de mantenimiento en 600 °C durante 60 minutos a una tasa de calentamiento de 20 °C/ minuto
- Se inició el ensayo

- Después del enfriamiento, se limpió la superficie del horno y las tapas de los mismos con una brocha especial, la cual forma parte del kit de herramientas del equipo.

2.1.4.2 Calibración

Con el fin de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos, los equipos fueron calibrados dentro de los rangos de temperatura estimados. El procedimiento detallado que se utilizó en la calibración, así como el perfil de temperatura usado para cada caso se encuentran en el Anexo IV.

2.1.4.3 Validación

Con el fin de determinar si la calibración llevada a cabo en los equipos garantizaba que los resultados obtenidos fueran confiables, se procedió a realizar una validación de los mismos, para lo cual se realizaron tres ensayos de cada estándar, a las mismas condiciones de velocidad y flujo de nitrógeno que se usaron para la calibración. De los termogramas de los ensayos realizados, se obtuvieron la temperatura onset de fusión y la entalpía, valores que fueron comparados con los datos teóricos para así calcular el porcentaje de error.

2.1.4.4 Barridos

Se utilizaron los calorímetros Netzsch DSC 204 F1 Phoenix y Shimadzu DSC 50 para lo cual, se siguió el procedimiento detallado a continuación:

- Se pesaron entre 10 y 20 mg de muestra
- Se colocó la muestra pesada en una celda de aluminio para posteriormente ser sellada.

- La celda sellada y una celda vacía que se utilizó como referencia fueron ubicadas el horno del calorímetro.

Para cada material se efectuaron tres repeticiones de cada ensayo con el fin de garantizar los resultados obtenidos.

Los ensayos en los calorímetros se llevaron a cabo en una atmósfera de nitrógeno con flujo de 20 mL/min y con base a la norma ASTM D3418-08, se realizaron los siguientes barridos:

- a) Primer calentamiento:** desde temperatura ambiente hasta 300 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min
- b) Paso isothermal:** se mantuvo la temperatura de 300 °C durante 10 minutos
- c) Primer enfriamiento:** desde 300 °C hasta temperatura ambiente
- d) Segundo calentamiento:** desde temperatura ambiente hasta 300 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min
- e) Paso isothermal:** se mantuvo la temperatura de 300 °C por 5 minutos
- f) Segundo enfriamiento:** desde 300 °C hasta temperatura ambiente
- g) Tercer calentamiento:** desde temperatura ambiente hasta 150 °C a una tasa de calentamiento de 20 °C/min
- h) Paso isothermal:** se mantuvo la temperatura de 150 °C por 5 minutos
- i) Tercer enfriamiento:** desde 150 °C hasta temperatura ambiente

El calorímetro Netzsch posee un intracooler, el cual permitió controlar la tasa de enfriamiento de tal forma que fuese la misma del calentamiento anterior, es decir 10 °C/min o 20 °C/min según sea el caso; en cambio el calorímetro Shimadzu posee un ventilador y una conexión que permite el flujo de agua de refrigeración solo hacia la parte inferior del horno, razón por la cual no fue posible controlar la tasa de enfriamiento.

2.1.4.5 Obtención de las transiciones térmicas

Para la obtención de las transiciones térmicas de los materiales puros se utilizaron los programas Proteus[®] del calorímetro Netzsch y TA-50[®] del calorímetro Shimadzu

Para la determinación de *la temperatura de cristalización y la temperatura y calor de fusión*, se usó el mismo procedimiento realizado con los estándares de calibración para lo cual, se utilizó el termograma del primer enfriamiento y del segundo calentamiento respectivamente.

Para la determinación de la *temperatura de transición vítrea*, se usó el método de la bisectriz detallado en el literal 10.2.9 de la norma ASTM D3418-08, para lo cual se utilizó el termograma obtenido del tercer calentamiento.

Para fines comparativos, se utilizaron los promedios de las tres determinaciones de cada transición térmica.

2.2 EVALUACIÓN DE LA MISCIBILIDAD DE LAS MEZCLAS DE POLIÉSTERES Y POLIAMIDAS

2.2.1 PREPARACIÓN DE MEZCLAS BINARIAS

2.2.1.1 Identificación de las mezclas a prepararse

En este estudio se analizaron dos sistemas de mezclas binarias:

- a) Poli(etilén tereftalato) grado inyección / Poli(butilén tereftalato) grado inyección: (PETb/PBT)
- b) Poliamida 6/ Poli(etilén tereftalato) grado extrusión: (PA6 / PETe)

Estos sistemas binarios fueron seleccionados debido a que son los poliésteres y poliamida de mayor importancia y demanda a nivel local y mundial. Otro aspecto que se consideró fue el hecho de que una de las limitaciones que presenta la calorimetría diferencial de barrido (DSC) es que para obtener resultados con ciertas garantías de fiabilidad en la determinación de miscibilidad, se requiere que los valores de T_g de los componentes puros de las mezclas difieran en al menos 20 °C (Banco Central del Ecuador, 2012; Luengo, 1993, p. 134).

Las composiciones de las mezclas de cada uno de los sistemas antes mencionados se muestran en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Composición de las mezclas binarias de los sistemas analizados

SISTEMA PETb / PBT		SISTEMA PETe / PA6	
% PETb (w/w)	% PBT (w/w)	% PA6 (w/w)	% PETe (w/w)
95	5	90	10
90	10	80	20
80	20	20	80
50	50	10	90
20	80		

2.2.1.2 Secado

Debido a la naturaleza higroscópica de los materiales a mezclarse, se efectuó un secado previo de los mismos para evitar que la humedad interfiera en su procesamiento. Se utilizó la estufa Venticell MMM; 22 L; 1 °C; 300 °C, la cual cuenta con un sistema de recirculación interna de aire.

Para el secado de los poliésteres, se siguió el método detallado en Ju y Yu (1997), en donde se establece que los materiales deben ser colocados en la estufa a 140 °C durante 5 horas (p. 91).

Para el secado de la poliamida, se utilizaron los parámetros recomendados por Roder (1995), en donde se especifica que el material debe ser secado a 80 °C durante 4 horas (p. 197).

2.2.1.3 Mezclado

Para el mezclado los materiales, se utilizó la cámara de mezcla Haake modelo Rheomix 600P con rotores tipo Roller. La Tabla 2.4 muestra las condiciones usadas para la preparación de las mezclas, las cuales están dentro de los rangos recomendados por el fabricante del equipo.

Tabla 2.4. Condiciones de operación del reómetro Haake Rheomix para la obtención de mezclas binarias de poliésteres y poliamidas

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura de Operación (°C)	260
Tiempo de mezcla (min)	5
Velocidad de los rotores (RPM)	60

Los cálculos realizados para determinar el peso de los componentes individuales de cada una de las mezclas se encuentran en el Anexo VII, para los cuales se consideró un 70 % de llenado de la cámara de mezclado y se utilizó la balanza Mettler Toledo PG5, 5000,00 g, 0,01g.

Para cada mezcla, se analizó la zona de estabilidad del reograma obtenido por el software Polyview™ que dispone el equipo.

Cabe señalar que antes de preparar cada mezcla, la cámara de mezclado y los rotores fueron minuciosamente limpiados en frío y en caliente con cepillos de bronce para prevenir daños por abrasión. Esta operación se realizó para evitar que residuos anteriores interfirieran en la concentración de los componentes de la mezcla a ser procesada, lo cual tomó gran cantidad de tiempo debido a la configuración de la cámara.

En la Figura 2.3 se puede observar la cámara de mezcla utilizada en el estudio



Figura 2.3. Cámara de mezcla Haake modelo Rheomix 600P

2.2.2 EVALUACIÓN DE LAS TRANSICIONES TÉRMICAS

Para la obtención de las transiciones térmicas de las mezclas binarias de poliésteres y poliamidas, se utilizó el mismo procedimiento para su obtención en los materiales puros. Se utilizaron los calorímetros Netzsch DSC 204 F1 Phoenix y Shimadzu DSC 50.

Para cada mezcla se realizaron los barridos efectuados en la caracterización térmica de los materiales puros, a las mismas condiciones especificadas para cada ensayo. El número de repeticiones de cada prueba fue determinado en función de la desviación estándar de los resultados obtenidos con los materiales puros, el cual fue un indicador del grado de repetitividad y reproducibilidad de las mediciones efectuadas.

La determinación de los valores de temperatura de cristalización, transición vítrea, fusión y calor de fusión fue posible, al igual que se hizo con los materiales puros, con ayuda del software que dispone cada equipo en el que se realizó el ensayo.

2.2.3 EVALUACIÓN DEL MEZCLADO DISPERSIVO Y DISTRIBUTIVO

Para evaluar la calidad del mezclado, se elaboraron cuatro estándares y una probeta de cada mezcla obtenida por moldeo a compresión. Se utilizó la prensa Carver Modelo 2112-2, 250 °C, 5 °C, 500 psi, 7 000 psi con las condiciones que se indican en la Tabla 2.5

Tabla 2.5. Condiciones de operación de la prensa para la obtención de probetas por moldeo a compresión

Temperatura (°C)	250
Presión (psi)	3 000
Tiempo (min)	1

Se utilizó un molde tipo flash con el fin de obtener el mismo espesor en todos los estándares y probetas. La Figura 2.4 muestra el molde tipo flash usado.

Para la elaboración de las probetas estándar, se utilizó PETb como fase dispersante y masterbatch PET IV=0,8 como fase dispersa. Estas probetas se elaboraron con el fin de obtener distintos niveles de mezclado:

- **Estándar 1:** Mezclado con mala distribución y mala dispersión
- **Estándar 2:** Mezclado con mala distribución y buena dispersión
- **Estándar 3:** Mezclado con buena distribución y mala dispersión
- **Estándar 4:** Mezclado con buena distribución y buena dispersión

Para cada estándar y cada mezcla, se determinó macroscópicamente el porcentaje de dispersión y distribución con el método utilizado en el Centro de Investigaciones aplicadas a Polímeros (CIAP):

- Se situó una cuadrícula de papel acetato de 10 x 10 sobre cada probeta
- Se colocó el conjunto probeta-cuadrícula sobre un negatoscopio
- Se fotografió el conjunto

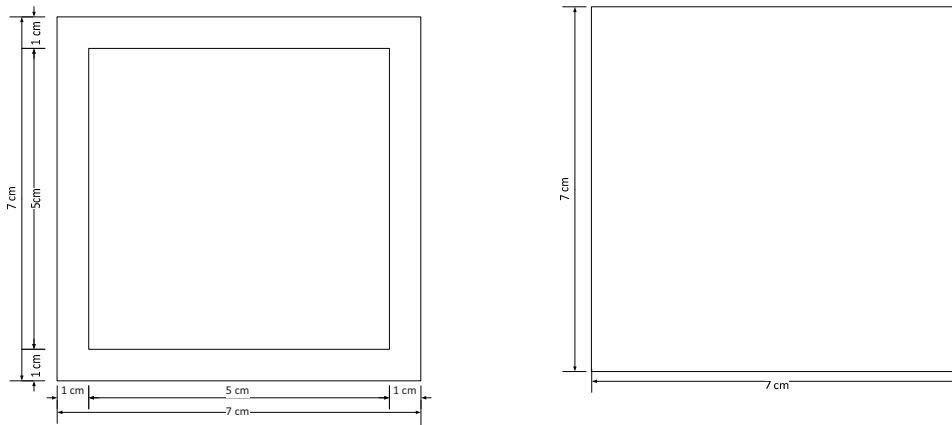


Figura 2.4. Molde tipo flash utilizado para la elaboración de probetas por moldeo a compresión

En la Figura 2.5 se muestra el negatoscopio utilizado:

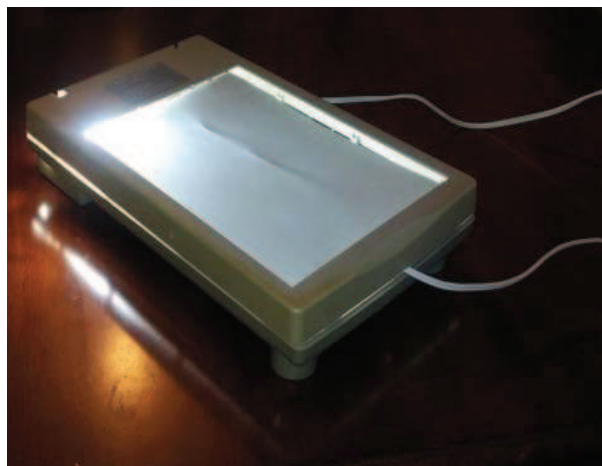


Figura 2.5. Negatoscopio utilizado para la evaluación de la calidad de mezclado

Para evaluar la distribución y distribución se utilizaron las fotografías obtenidas con la ayuda del negatoscopio. Para la distribución, de los 100 cuadros presentes en la cuadrícula, solo se tomaron en cuenta aquellos que contenían pigmentos grises. En el caso de la dispersión, de los cuadros anteriores contabilizados, se seleccionaron los que poseían un contenido mayor o igual a dos pigmentos y se calculó el porcentaje.

2.3 APLICACIÓN DE LAS CONDICIONES DEFINIDAS PARA LA MEZCLA DE POLIÉSTERES Y POLIAMIDAS COMERCIALES A MATERIALES RECICLADOS

2.3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Sobre la base de las pruebas realizadas con las mezclas entre materiales puros, se seleccionó el par a ser probado con materiales reciclados, para lo cual se consideró la miscibilidad entre los componentes mediante el análisis de sus propiedades térmicas, principalmente de la temperatura de transición vítrea, su grado de dispersión y distribución y su facilidad de obtención en el mercado.

2.3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS

Para la elaboración de la mezcla reciclada, se utilizaron los materiales que se enlistan en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6. Materiales reciclados utilizados en el estudio

MATERIAL	NOMENCLATURA
Poli (etilén tereftalato) (PET) proveniente de botellas recicladas suministrado por la empresa ENKADOR	PETbr
Poli (butilén tereftalato) (PBT) proveniente de bombillas ahorradoras usadas	PBTr

En la Figura 2.6 se muestra los materiales usados para la elaboración de la mezcla reciclada:



PETbr



PBTr

Figura 2.6. Materiales reciclados usados en la investigación

Los materiales reciclados fueron caracterizados mediante la utilización de las siguientes técnicas:

- Análisis por espectroscopia de infrarrojo (FTIR)
- Determinación de Densidad
- Determinación del Contenido de Cenizas
- Determinación de las Propiedades Térmicas

En todos los casos se utilizaron los mismos procedimientos y equipos empleados en la caracterización de los materiales puros. Para la determinación de las propiedades térmicas de los reciclados en estudio se utilizó solo el calorímetro diferencial de barrido Shimadzu modelo DSC 50.

2.3.3 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA BINARIA CON MATERIALES RECICLADOS

2.3.3.1 Secado

Se efectuó un secado previo de los materiales reciclados para evitar que la humedad interfiera en su procesamiento. Al igual que en los materiales puros, se utilizaron los equipos y el método detallado en Ju y Yu (1997).

2.3.3.2 Mezclado

Para el mezclado, se utilizó la cámara Haake modelo Rheomix 600P con rotores tipo Roller. Los parámetros de operación del equipo fueron los mismos establecidos para el procesamiento de los materiales puros y para la mezcla obtenida se analizó la zona de estabilidad del reograma obtenido por el software que dispone el equipo.

2.3.4 EVALUACIÓN DE LAS TRANSICIONES TÉRMICAS

Para la obtención de las transiciones térmicas de la mezcla binaria reciclada de poliésteres, se efectuó el mismo procedimiento para su obtención en los materiales puros, para lo cual se utilizó el calorímetro Shimadzu DSC 50 y de igual manera, para la evaluación de las transiciones térmicas se utilizó el software disponible en el equipo en el que se realizó el ensayo.

2.3.5 EVALUACIÓN DEL MEZCLADO DISPERSIVO Y DISTRIBUTIVO

Para evaluar la calidad del mezclado se elaboró una probeta, con un molde tipo flash, de la mezcla reciclada por moldeo a compresión. Se utilizaron los mismos equipos y condiciones establecidas para los materiales puros y se determinó el

porcentaje de dispersión con la ayuda del negatoscopio. Finalmente se compararon los porcentajes de las probetas obtenidas de los materiales reciclados y comerciales.

2.4 DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE MEZCLADO CON MATERIALES EN ESTUDIO RECICLADOS

2.4.1 INGENIERÍA CONCEPTUAL

2.4.1.1 Capacidad y localización de la planta

- **Capacidad**

Para determinar la capacidad de producción de la planta, se consideraron las importaciones de PET en el año 2011, que según datos de la Aseplas (2011) fueron de aproximadamente 47 000 t (p. 34). De esta cantidad, el 10 % podría reutilizarse (EMASEO, 2010, p.2). Se estimó que una planta industrial procesaría el 20 % del material reciclado disponible, y la planta piloto un 10 % de los mismos.

- **Localización**

Para seleccionar el lugar en donde se situaría la planta se consideró la disponibilidad de red eléctrica, agua potable, servicio telefónico e internet, vías y carreteras para acceso, su cercanía a los proveedores, costos de construcción y que su ubicación no afecte el normal desenvolvimiento de los habitantes del sector.

2.4.2 INGENIERÍA BÁSICA

2.4.2.1 Descripción del alcance del diseño

Se realizó la implementación del proceso tecnológico que implicó el diseño de las diferentes áreas de la industria como son: producción y bodegas, para la eficiente comprensión del diseño y proceso se realizaron los diagramas de bloques, flujo, plano de distribución (lay out) de la planta y su plano de elevación.

2.4.2.2 Descripción detallada del proceso

El proceso a ser implementado se basó en el esquema establecido por Hensen (1997) en el cual se detallan los equipos que deberían ser parte de la línea de extrusión (p. 601).

Recepción de la Materia Prima: La materia prima utilizada será recibida en forma de pellets en el caso del material virgen y en escamas de material reciclado. Los sacos del material serán pesados y luego apilados en el área designada para este fin.

Premezclado de los componentes de la mezcla: El premezclado de las materias primas comerciales y recicladas se lo hará en un tambor provisto de paletas, para lo cual se pesarán previamente los componentes de la mezcla con el fin de que sean agregados en la proporción adecuada para garantizar una relación 95 % PET – 5 % PBT.

Secado de las materias primas: Debido a la naturaleza higroscópica de los materiales a ser mezclados, es necesario secarlos para evitar la degradación de los mismos al ser sometidos a altas temperaturas y esfuerzos de cizallamiento. Esta operación será efectuada en un sistema de secado seleccionado para este efecto, el cual reducirá el contenido de agua a aproximadamente 0,005 %, valor recomendado para procesar poliésteres.

Almacenamiento del material seco: Inmediatamente después de haber sido secados, los materiales serán transportados, en forma neumática, hasta un silo de almacenamiento hermético. De esta forma se evitará que los mismos capturen nuevamente la humedad del ambiente y se permitirá la operación en continuo del resto de equipos de la línea de producción, ya que al ser el secado la operación que denota más tiempo, el proceso se vería retrasado si no se cuenta con un stock.

Mezclado de los materiales: El mezclado de los materiales se hará en fundido, para lo cual se utilizará una extrusora. Se establecerán los perfiles de temperatura y velocidad de rotación del husillo y se considerará que el transporte de los poliésteres desde el silo de almacenamiento hasta la tolva de alimentación de la extrusora será vía neumática.

Enfriamiento de la mezcla extruida: Las hebras de extruido necesitarán ser enfriadas para poder ser pelletizadas, razón por la cual se utilizará un baño de enfriamiento con agua con el fin de disminuir la temperatura del material que sale de la boquilla de la extrusora.

Se seleccionó el enfriamiento con agua debido a que, en caso de hacerlo con aire, esta operación requeriría mayor tiempo y los pellets podrían pegarse una vez que han sido cortados, incluso el equipo a usarse sería más espacioso y costoso. Además, la bibliografía consultada y los proveedores de equipos de extrusión de poliésteres, recomiendan un enfriamiento de este tipo y también, las plantas de procesamiento locales de estos materiales, como Enkador, lo utilizan (Fakirov, 2002, p. 435; Hensen, 1997, p. 601).

La hidrólisis del extruido podría ser una consecuencia directa de un enfriamiento con agua; sin embargo para que esta reacción se lleve a cabo se necesitarían además de elevadas temperaturas, presiones de alrededor de 1-4 MPa y esfuerzos de cizallamiento. Al salir el material por la boquilla de la extrusora, estará sometido a presión atmosférica y su temperatura disminuirá al contacto con

el agua con el agua de enfriamiento y por lo tanto, la velocidad de hidrólisis será mínima (Automatismo Industrial, 2006,p.7; Nadkarni, 2002, p. 1237).

En cuanto a la humedad, se ha encontrado que los poliésteres absorben entre 0,1 y 0,2 % de agua al ser almacenados durante 4 días en sumersión (20 °C). El tiempo en el cual el extruido estará en contacto con el agua será mucho menor al indicado y posteriormente se eliminará el agua de la superficie su superficie. Es importante mencionar que antes de procesar nuevamente el extruido, se debe realizar un secado previo del mismo para eliminar la humedad ligada (Binsack, 1996, p. 73).

Eliminación del agua de la superficie del extruido: Antes de entrar al pelletizador, se necesitará que el extruido tenga la menor cantidad de agua adherida en su superficie y para este efecto se utilizará un soplador de aire para su remoción.

Pelletizado: Mediante esta operación la hebra de extruido será cortada en forma de granza que es la forma habitual en la que comercializan los plásticos antes de ser procesados. Para este fin se empleará un pelletizador de cuchillas rotativas.

Ensacado: La comercialización de la mezcla obtenida se la hará en presentaciones de 25 kg y para realizar el dosificado del material se utilizará una ensacadora volumétrica.

2.4.2.3 Balance de Masa

Debido a que el secado es la operación que toma más tiempo y la más crítica, se consideró contar con un stock para que el resto del proceso pudiese ser en continuo y también así, poder asegurar que no haya paros si hay algún problema con los equipos de secado. Por esta razón se realizaron los balances de masa para una reserva de materia prima seca de dos días, los mismos que se encuentran en el Anexo VIII.

2.4.2.4 Criterios para la selección de equipos

Para la selección de equipos se estimó que los mismos trabajarán 8 horas diarias y que deben tener un 20 % de sobredimensionamiento

Extrusora: Para la selección de la extrusora se consideró la miscibilidad de los componentes de la mezcla a ser procesada. Los materiales comerciales y reciclados a ser utilizados, por su similitud morfológica no presentarán mayor dificultad para ser mezclados, operación que se podría realizar en un equipo monohusillo.

Debido a la naturaleza higroscópica de los materiales y si se toma en cuenta que al ser reciclados, estos podrían contener impurezas, se consideró necesario que el equipo en el que van a ser mezclados deba contar con un puerto de desgasificación al vacío, para poder extraer la mayor cantidad de sustancias volátiles que pudiesen interferir con el producto a ser obtenido.

Para definir la relación L/D de la extrusora a ser seleccionada, se usaron los valores de Giles, Mount III y Wagner (2005), en donde se establece que los poliésteres deben ser procesados en equipos con relaciones L/D de 24:1 a 30:1 (p. 218). Para definir los perfiles de temperatura se tomaron los rangos reportados en Naranjo et al., para cada zona de calentamiento del husillo (pp. 85, 89). Se consideró también que, los materiales reciclados son más susceptibles a la degradación y que según Rosato (1998), el PET, componente en mayor proporción, debe ser procesado con un perfil de temperaturas inverso (p. 387).

Los cálculos relativos a la selección de la extrusora se encuentran en el Anexo IX.

Secador: Stoughton (2000) establece los siguientes parámetros para la selección del secador (p. 63):

- **Temperatura de secado:** la elevación de temperatura permite que las moléculas se mueven más vigorosamente, lo cual debilita las fuerzas que

unen las moléculas de agua a las cadenas de polímero. Por encima de una cierta temperatura estas atracciones se debilitan y se permite el libre movimiento de las moléculas para el proceso de secado. En el caso de poliésteres se recomiendan temperaturas entre los 140 a 160 °C.

- **Punto de rocío del aire de secado:** el punto de rocío es un indicador de la cantidad de humedad que posee el aire, a mayor cantidad de agua, mayor presión de vapor y mayor punto de rocío. Si este parámetro es reducido, la capacidad de absorber humedad aumentará. Un aire con baja temperatura de rocío crea una baja presión de vapor alrededor de los pellets lo cual provoca que la humedad interna migre hacia la superficie exterior y sea arrastrada por la corriente circundante.

Existen dos tipos de secadores para polímeros higroscópicos: de aire caliente y deshumidificadores, éstos últimos permiten obtener aire con puntos de rocío de hasta -60 °C. Como se puede observar en la Figura 2.7, un aire con un punto de rocío muy bajo permite disminuir el contenido de agua del material hasta porcentajes inferiores a los obtenidos al usar un secador de aire caliente en el mismo tiempo de operación.

Si se opta por un deshumidificador para el secado de poliésteres, el aire a usarse debe tener una temperatura de rocío entre -40 °C y -50 °C (Reliance Industries Limited, 2003, p. 3).

- **Tiempo:** La humedad tarda en migrar del interior del polímero hacia la superficie para luego salir completamente del material. Para poliésteres que han estado expuestos al ambiente por más de 24 horas, se recomienda un tiempo de secado entre 4 a 6 horas (Lukaszyk, 2000, p.49).
- **Flujo de aire:** si el flujo de aire no es suficiente, todo el material no llegará a calentarse a la temperatura necesaria durante el tiempo de residencia en el secador y el polímero quedará con cierta humedad, lo que podría ocasionar la no uniformidad de sus propiedades. Para el secado de

poliésteres se recomienda un flujo de aproximadamente $3,5 \text{ m}^3/(\text{kg} \times \text{h})$ (Reliance Industries Limited, 2003, p. 3).

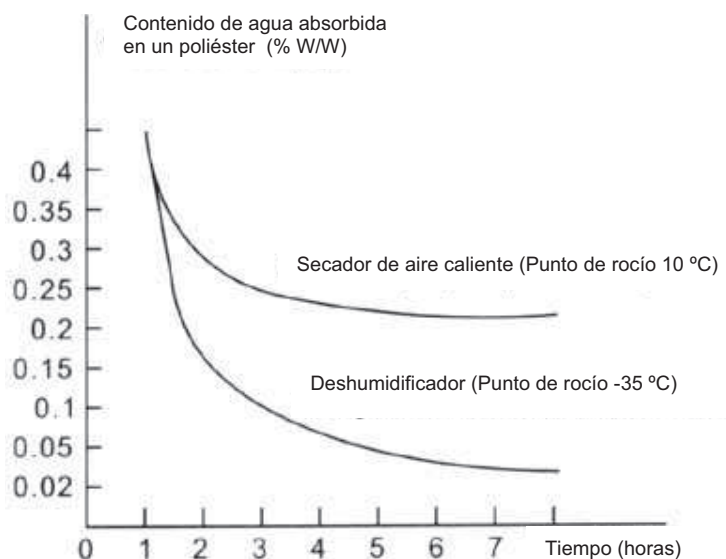


Figura 2.7. Comparación del contenido de humedad final obtenido al utilizar un secador de aire seco y un deshumidificador (Kenplas Industry Limited, 2012)

Los cálculos realizados para determinar la capacidad del secador se encuentran en el Anexo IX.

Silo de almacenamiento: El diseño del silo se realizó mediante el Apéndice A de la norma API 650, y el material del cual estará fabricado será de acero inoxidable por su resistencia a la humedad ambiental e impermeabilidad, con lo cual no habrá riesgo de que el material almacenado en su interior absorba agua.

Los cálculos realizados para determinar la capacidad del secador se encuentran en el Anexo IX.

Pelletizador: Para la selección del pelletizador se consideró su capacidad de producción, la cual está estrechamente relacionada con la tasa de producción de la extrusora.

Ensacadora: Para definir el tipo de ensacadora a utilizarse se tomó en cuenta la presentación que tendrá el producto final en el mercado. Se optó por un modelo semiautomático, en donde el operador tendrá que colocar manualmente la bolsa para su llenado y sellado. Para facilitar el transporte del material desde el pelletizador hasta este equipo, se utilizará un tornillo sin fin que estará conectado a un recipiente colocado debajo del pelletizador.

2.4.2.5 Balance de energía

El consumo energético de la planta fue determinado mediante la potencia de los equipos a utilizarse y el número de horas de funcionamiento de los mismos.

2.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DE LA PLANTA PILOTO DISEÑADA

Para la evaluación económica de la planta piloto diseñada, se consideró el costo por unidad de producción para lo cual se tomaron en cuenta los costos de materia prima, salario de los empleados, servicios auxiliares y los sacos de PP en que se empacará el producto. Se calculó también el valor de la inversión fija proveniente de equipos, terrenos y construcciones.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PUROS

3.1.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO

En la Figura 3.1 se muestran los espectros IR del PETe y PETb superpuestos con el estándar disponible en el espectrofotómetro en donde se realizaron las pruebas.

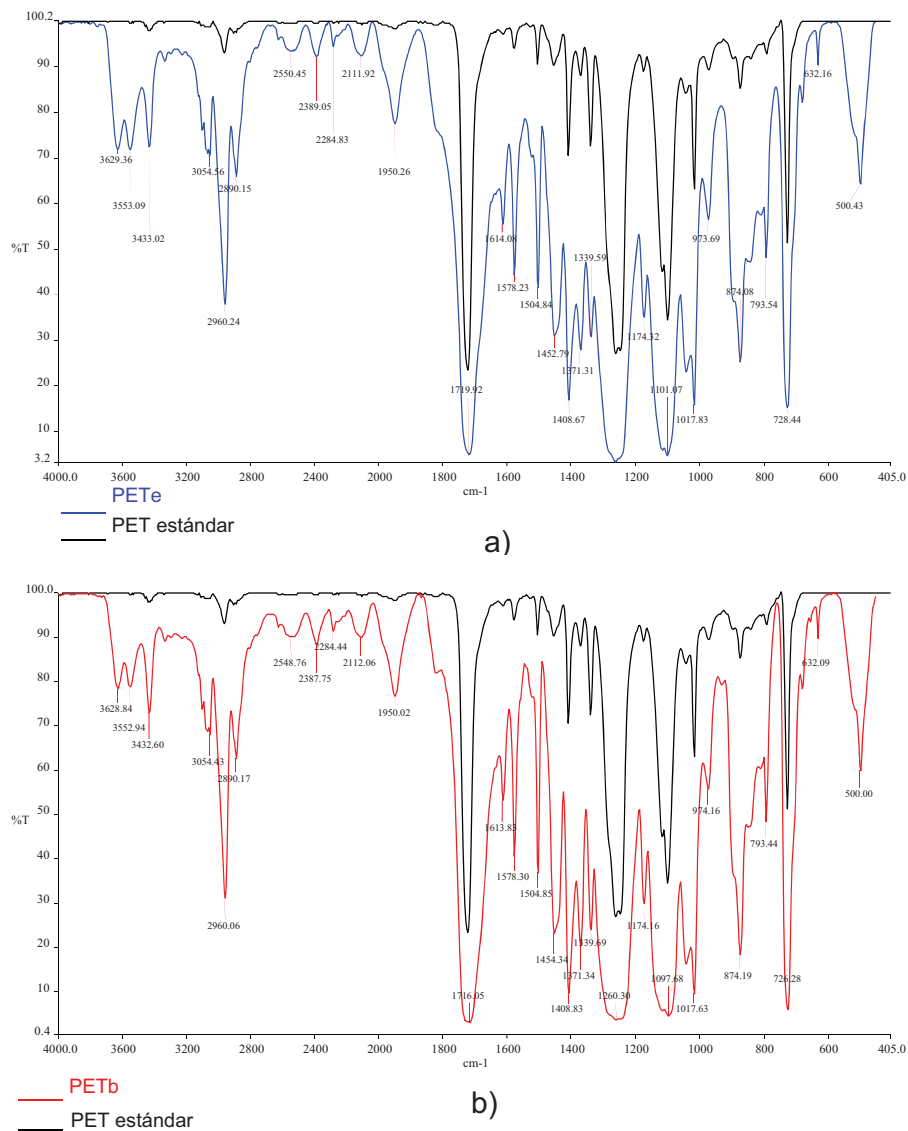


Figura 3.1. Espectros infrarrojos de a) PETe y b) PETb superpuestos con estándar

La Figura 3.1 indica que los espectros no estuvieron superpuestos con los estándares debido a que existió una diferencia en la intensidad de las bandas, lo cual fue consecuencia del espesor de la lámina utilizada para la obtención del espectro de la muestra. Al utilizar la técnica de transmitancia, la ley de Lambert y Beer señala que a mayor espesor de la lámina empleada, mayor será la intensidad de las bandas (Smith, 2011, p. 149).

En la Figura 3.2 se muestran los espectros IR obtenidos de los dos tipos de PET estudiados.

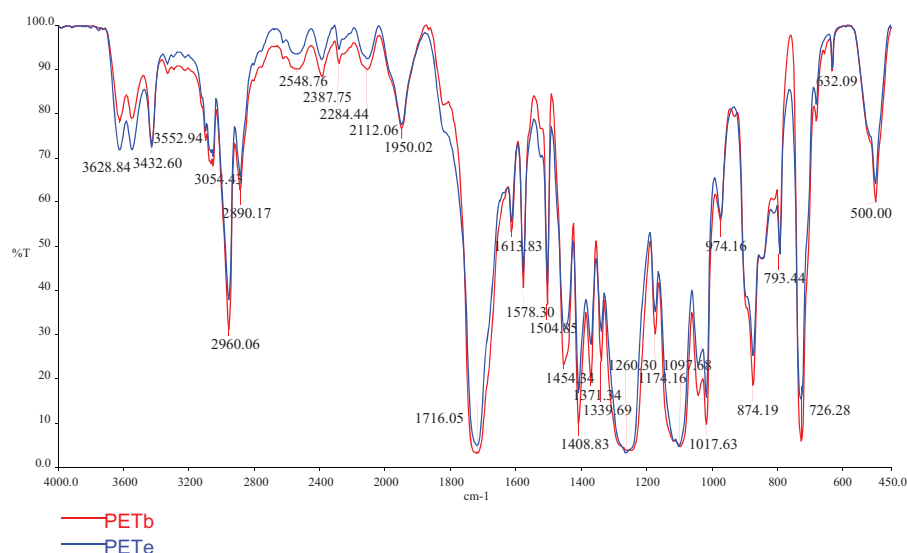


Figura 3.2. Espectros infrarrojos de a) PETe y b) PETb superpuestos

Como se puede observar, los espectros de los dos tipos de PET utilizados coincidieron en todas las bandas y están prácticamente superpuestos, lo que demostró que ambas muestras se trataron efectivamente del mismo material.

En la Figura 3.3 se muestra el espectro IR del PBT analizado. Al igual que el caso del PET, las bandas del material de prueba coincidieron con las del estándar del equipo, aunque existió una diferencia en la intensidad de las bandas por las razones antes expuestas.

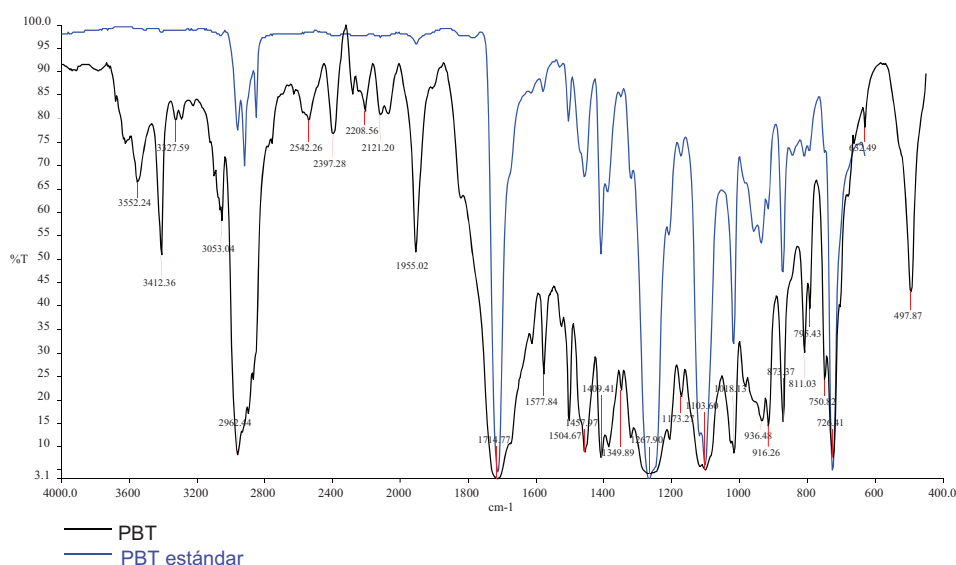


Figura 3.3. Espectro infrarrojo de PBT superpuesto con estándar

Al analizar los espectros de PETe, PETb y PBT, se determinó que las muestras se trataron de ésteres de ácido carboxílico tipo tereftalato debido a que se encontraron las bandas características en $1\ 265$, $1\ 110$, 867 y $725\ \text{cm}^{-1}$. La única diferencia encontrada entre los espectros de estos materiales fue la banda presente a los $974,16\ \text{cm}^{-1}$ en el espectro del PET, en la zona correspondiente a la huella digital, lo cual permite diferenciarlos entre sí. En el análisis de los grupos funcionales presentes, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Análisis de grupos funcionales presentes en los espectros de PET y PBT

GRUPO FUNCIONAL	NÚMERO DE ONDA	GRUPO FUNCIONAL	NÚMERO DE ONDA
Alquilo	3 030-2 855 1 485-1 415	Aromático fenoxi o amino sustituido	1 620-1 585 1 525-1 475 1 340-1 210 880-690
Aromático 1,4 sustituido	1 525-485 850-790	Ester de ácido carboxílico tipo tereftalato	1 735-1 710; 1 510-1 490 1 420-1 395; 1 280-1 250 1 115-1 085; 1 030-1 005 885-860

En la Figura 3.4 se muestra el espectro obtenido de la poliamida 6 en estudio.

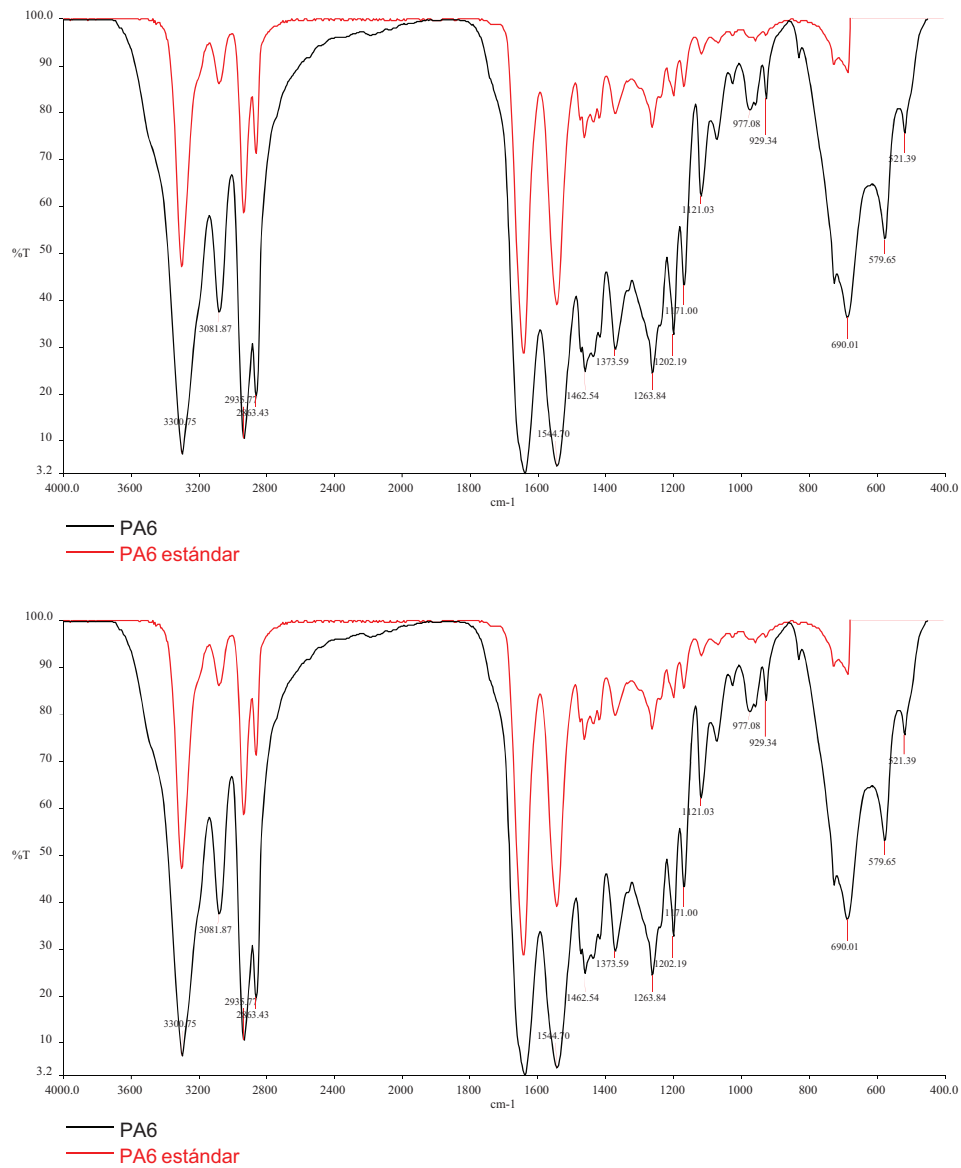


Figura 3.4. Espectro infrarrojo de PA6

Al analizar el espectro de la Figura 3.4, se puede observar que la muestra correspondió a una amida alifática debido a que se encontraron las bandas características en 3 300, 1 640 y 1 540 cm^{-1} . En el análisis de los grupos funcionales presentes, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de PA6

GRUPO FUNCIONAL	NÚMERO DE ONDA	GRUPO FUNCIONAL	NÚMERO DE ONDA
Alquilo	2 290-2 855 1 485-1 415	Amida alifática secundaria	3 350-3 270 1 690-1 630 1 565-1 500
Hidroxi o amino	3 540-3 200 1 205-885		

3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de densidad obtenidos para cada material

Tabla 3.3. Valores de densidad obtenidos para cada material en estudio

	Material			
	PETb	PETe	PBT	PA6
Densidad experimental \pm desviación estándar (g/cm^3)	1,38 \pm 0,02	1,32 \pm 0,00	1,38 \pm 0,02	1,15 \pm 0,01
*Densidad bibliográfica (g/cm^3)	1,38-1,40		1,30-1,32	1,12-1,15

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

*(Ehrenstein et al., 2004, pp. 320-330)

Como se observa en la Tabla 3.3, los valores experimentales de los materiales puros estuvieron dentro de los rangos que aparecen en la bibliografía con excepción del PBT. La densidad experimental del PBT fue superior a los valores esperados debido a que este material estaba reforzado con 15 % de fibra de vidrio, lo cual incrementó su densidad. Los datos experimentales obtenidos para la determinación de la densidad se encuentran en el Anexo II.

3.1.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS

La Tabla 3.4 muestra el porcentaje de inorgánicos presentes en cada una de las muestras.

Tabla 3.4. Porcentaje de inorgánicos presentes en cada material en estudio

Porcentaje de inorgánicos (%)	Material			
	PETb	PETe	PBT	PA
$\bar{x} \pm \sigma$ (n = 3)	0,06 ± 0,01	0,02 ± 0,00	15,34 ± 0,01	0,23 ± 0,01

El contenido de inorgánicos presentes en los materiales puros fue inferior al 1%, lo cual indicó que los materiales no contenían cargas ni aditivos y se encontraban en estado puro, lo cual facilitó su procesamiento. El 15,34% de inorgánicos presentes en el PBT correspondió a la fibra de vidrio presente en el material lo cual concordó con el valor de la hoja de especificación. Los datos experimentales obtenidos para la determinación del porcentaje de inorgánicos, se encuentran en el Anexo III.

3.1.4 DETERMINACIÓN DE LAS TRANSICIONES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES PUROS

3.1.4.1 Validación de los calorímetros

a) Validación del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix

Las temperaturas y entalpías promedio de los ensayos que se realizaron con los estándares después de la calibración, así como el error entre estos valores y los teóricos, se aprecian en la Tabla 3.5.

Como se puede observar en la Tabla 3.5, el porcentaje de error máximo encontrado en la temperatura onset de fusión fue de 0,77 %, lo cual indica que el equipo fue calibrado en el rango de temperatura establecido. En el caso de la entalpía, el error del 2,49 % correspondiente al In y del 1,36 % del Sn, podrían deberse a la variación en la determinación del onset de fusión en cada termograma. Si bien se utilizó una línea base lineal en todos los casos, se requirió de gran precisión para poder determinar el punto en el cual empezó a cambiar la

pendiente de la misma, lo cual ocasionó la existencia de un error de apreciación y por lo tanto una diferencia entre el valor medido y el valor real; sin embargo se puede apreciar que los valores calculados no difieren en gran proporción a los teóricos y por esta razón se los puede considerar como fiables.

Tabla 3.5. Comparación entre la temperatura onset de fusión y la entalpía teórica y calculada después de la calibración del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix

Estándar	Temperatura onset de fusión			Entalpía de fusión		
	Temperatura Calculada(°C)	Temperatura Teórica(°C)	% Error	Entalpía Calculada (J/g)	Entalpía Teórica (J/g)	% Error
Hg	-39,10	-38,80	-0,77	-11,41	-11,40	-0,12
In	156,60	156,40	0,13	-29,31	-28,60	-2,49
Sn	232,73	231,50	0,53	-59,68	-60,50	-1,36

\bar{x} (n = 3)

Los termogramas obtenidos para la validación del calorímetro Netzsch se encuentran en el Anexo V.

b) Validación del calorímetro Shimadzu DSC 50

Las temperaturas y entalpías promedio de los ensayos que se realizaron con los estándares y el error entre estos valores y los teóricos, se aprecian en la Tabla 3.6.

El porcentaje de error máximo encontrado para la temperatura onset de fusión fue de 0,35 % y para la entalpía de fusión fue de 0,19 %. Los porcentajes de error calculados indicaron la confiabilidad de los datos que entregó el calorímetro. El error encontrado en la determinación de la entalpía de fusión del ácido benzoico, se debió a la inestabilidad de la línea base provocada por la sublimación del material durante el ensayo, lo cual dificultó la estimación del área del pico de fusión.

Los termogramas obtenidos para la validación del calorímetro Shimadzu se encuentran en el Anexo VI.

Tabla 3.6. Comparación entre la temperatura onset de fusión y la entalpía teórica y calculada después de la calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50

Estándar	Temperatura onset de fusión			Entalpía de fusión		
	Temperatura Calculada(°C)	Temperatura Teórica(°C)	% Error	Entalpía Calculada	Entalpía Teórica	% Error
				(J/g)	(J/g)	
Ácido Benzoico	122,45	122,35	0,08	127,24	147,2	-13,56
In	156,44	156,60	-0,10	28,60	28,60	0
Sn	232,71	231,90	0,35	60,60	60,50	0,17
Bi	272,33	271,40	0,34	53,15	53,10	0,09
Zn	419,97	419,50	0,11	107,30	107,5	0,19

\bar{x} (n = 3)

3.1.4.2 Obtención de las transiciones térmicas

a) Temperatura de cristalización

En la Figura 3.5 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos realizados correspondientes al primer enfriamiento para la determinación de la temperatura de cristalización del PETb y PETe.

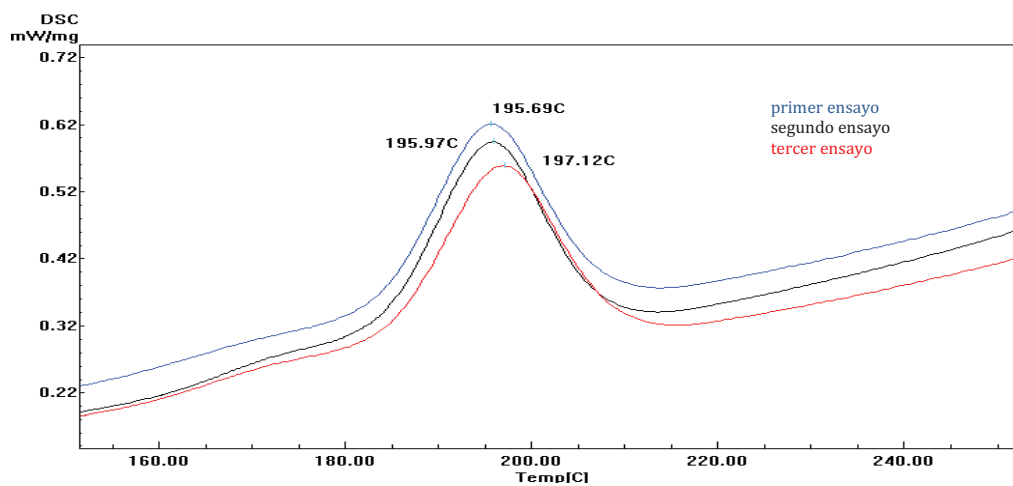
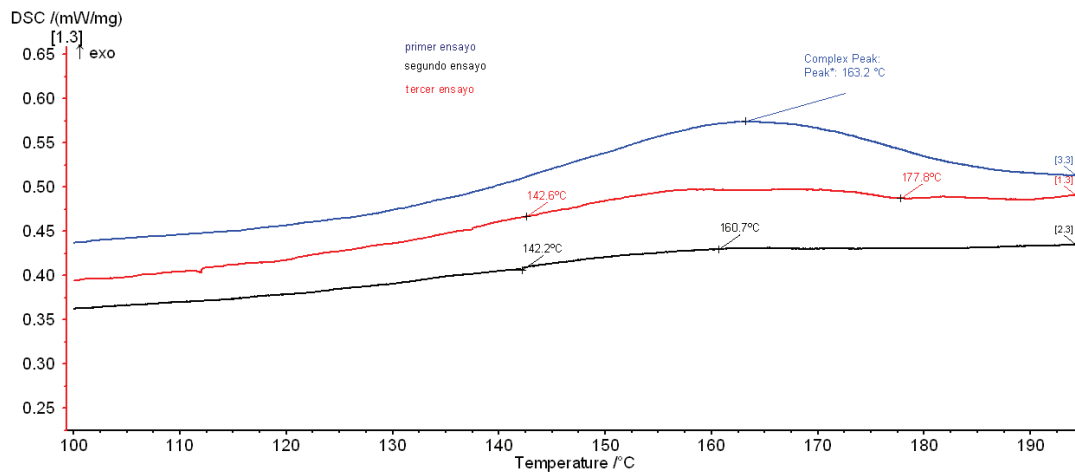


Figura 3.5. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PETb (gráfico superior) y PETe (gráfico inferior)

Como se observa en el gráfico superior de la Figura 3.5, el cual corresponde a los termogramas obtenidos de la cristalización del PETb, solo en el primer ensayo se pudo determinar un máximo de cristalización, correspondiente a 163,2 °C, en las demás curvas, solo se aprecian hombros desde los 140 °C hasta los 180 °C aproximadamente. La forma de las curvas sugiere una distribución ancha en el tamaño de los cristales, lo cual podría ser consecuencia del estado amorfo inicial del material y de la nucleación heterogénea, que originaría la formación de estructuras cristalinas finas y relativa transparencia, que es una propiedad necesaria para este material con el cual se fabrica botellas.

En el gráfico inferior de la Figura 3.5, el cual corresponde a los termogramas obtenidos del PETe, se observa claramente la existencia de un máximo en todas las curvas, cuyo valor promedio es de $196,2 \pm 0,8$ °C. La simetría de las curvas indica la similitud en los tamaños de los cristales formados.

En ambos casos, los cristales formados corresponden a la estructura triclinica característica del PET (Binsack, 1996, p. 50). Cabe aclarar que existió una diferencia en la velocidad de enfriamiento en ambos materiales debido a que los ensayos realizados en el PETb se realizaron a una velocidad de -10 °C/ min, mientras que para PETe la velocidad de enfriamiento no se realizó a una tasa constante debido a que la configuración del equipo utilizado (Shimadzu) no permite un control de este parámetro, lo cual a su vez constituye una fuente de error en las mediciones.

En la Figura 3.6 se muestran los termogramas de los ensayos realizados correspondientes al primer enfriamiento para la determinación de la temperatura de cristalización del PBT. Como se puede apreciar, la forma de las curvas indica una distribución estrecha en cuanto a las dimensiones de los cristales formados, es decir la mayoría son del mismo tamaño y corresponden a la forma de cristalización alfa (α) que es termodinámicamente estable y es observada cuando se lleva a cabo una enfriamiento lento (Calhoun y Peacock, 2006, p. 359). Se obtuvo un máximo cuyo valor promedio es de $192,8 \pm 0,5$ °C.

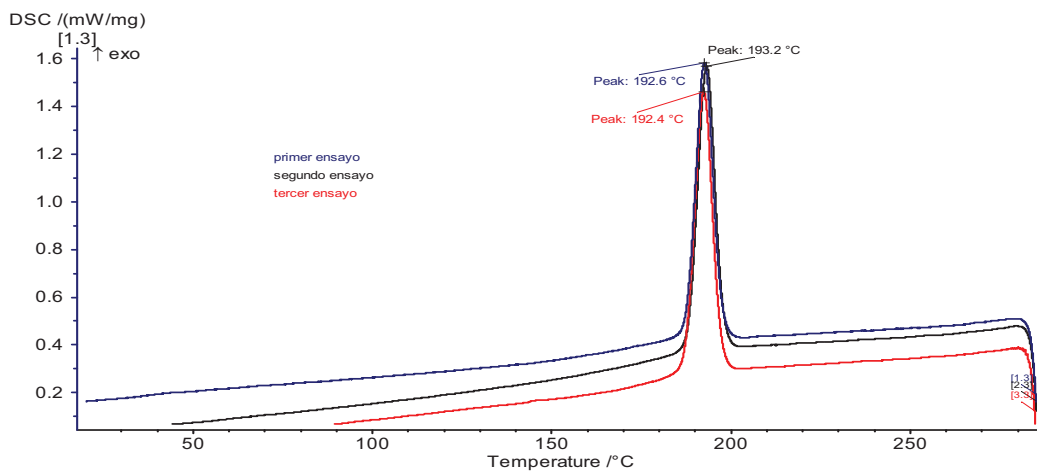


Figura 3.6. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PBT

En la Figura 3.7 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al primer enfriamiento para la determinación de la temperatura de cristalización de PA6.

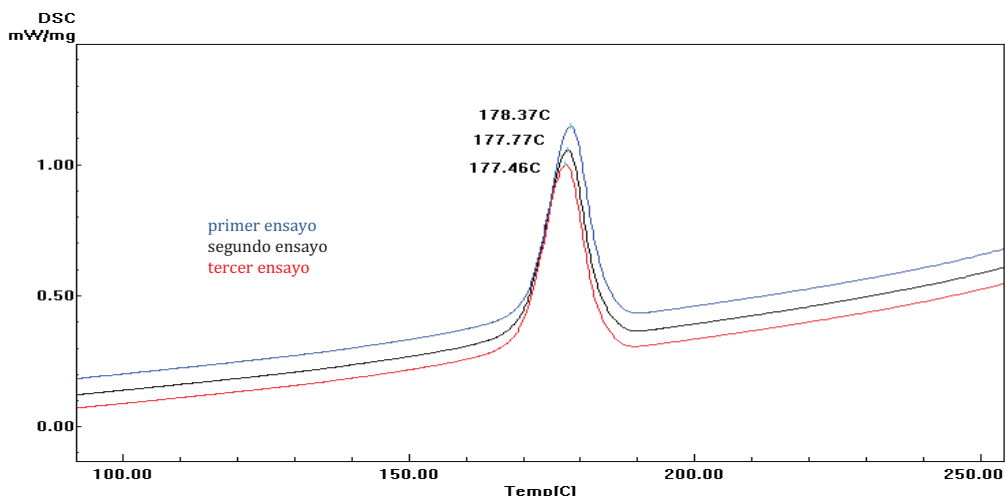


Figura 3.7. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PA6

Las curvas de la Figura 3.7 muestran que la mayoría de los cristales formados tienen el mismo tamaño y corresponden a la estructura monoclinica alfa (α) que es en la que usualmente cristaliza el nylon 6 (Clark y Xenopoulos, 1995, p. 115).

Se aprecia también que en todas las curvas se obtuvo un máximo de cristalización cuyo valor promedio es de $177,9 \pm 0,5$ °C.

En la Tabla 3.7 se muestra una comparación entre los valores promedio experimentales y los reportados en bibliografía de la temperatura de cristalización.

Tabla 3.7. Valores experimentales y bibliográficos de temperatura de cristalización de los materiales puros

MATERIAL	TEMPERATURA DE CRISTALIZACIÓN (°C)	
	EXPERIMENTAL	BIBLIOGRÁFICA
PETb	$163,2 \pm 0$	150-180 ^a
PETe	$196,2 \pm 0,8$	
PBT	$192,8 \pm 0,5$	190-210 ^b
PA6	$177,9 \pm 0,5$	177,5 ^c

$\bar{x} \pm \sigma$ (n = 3)

^a(Awaja y Pavel, 2005, p. 1456); ^b(Binsack, 1996, p. 25); ^c(Geil y Rybnikar , 1991; p.7)

Como se puede observar en la Tabla 3.7, los valores experimentales de temperatura de cristalización se encuentran dentro del rango bibliográfico reportado a excepción del PETe, el cual también muestra la mayor desviación estándar. Estas variaciones pueden deberse a la velocidad de enfriamiento utilizada, la cual no fue constante para los tres ensayos realizados debido a las razones explicadas anteriormente.

b) Temperatura de transición vítrea

En la Figura 3.8 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al tercer calentamiento para la determinación de la temperatura de transición vítrea del PETb y PETe.

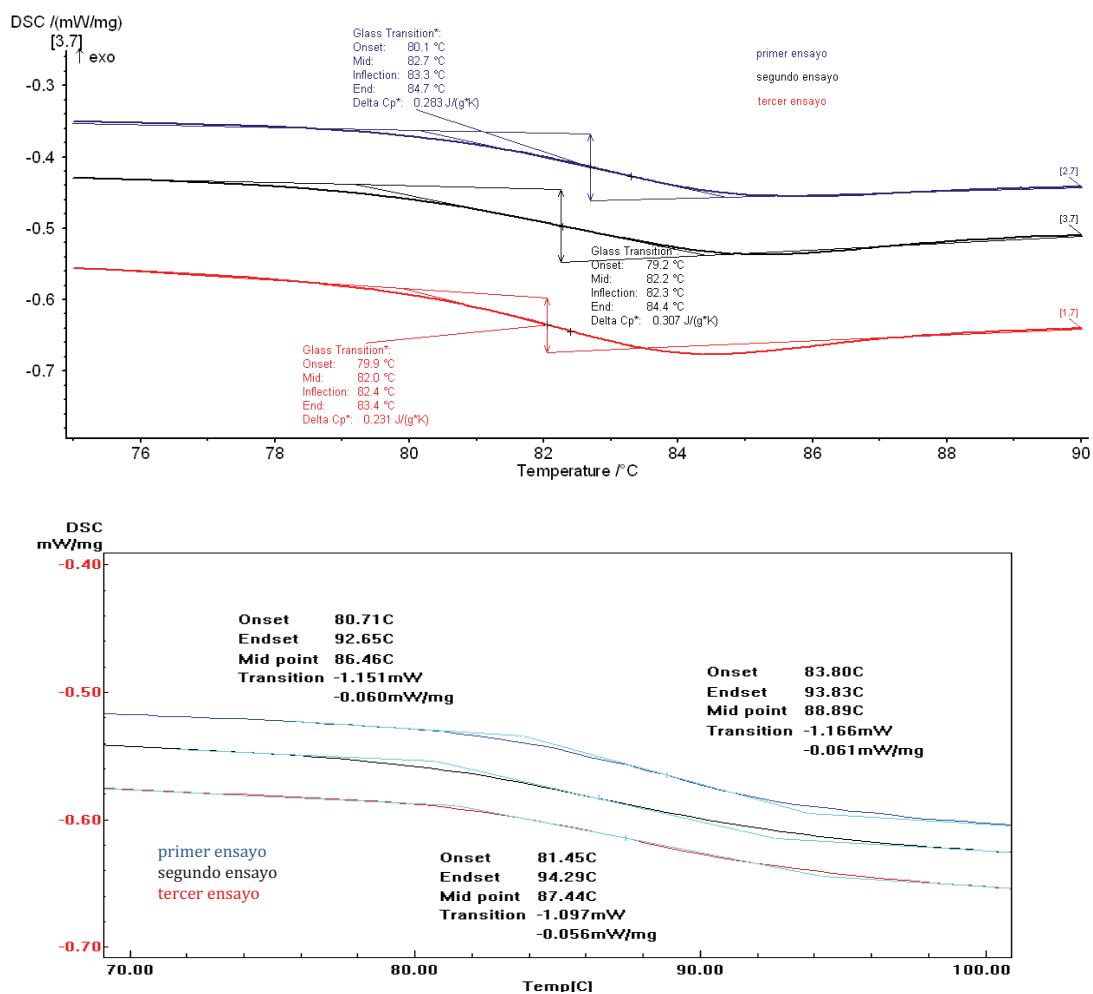


Figura 3.8. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PETb (gráfico superior) y PETe (gráfico inferior)

La temperatura de transición vítrea (T_g) obtenida para el PETb tuvo un valor promedio de $82,3 \pm 0,4$ °C, mientras que la del PETe fue de $87,6 \pm 1,2$ °C. Si bien los dos calorímetros utilizados emplean el método del punto medio para evaluar la T_g , la inestabilidad de la línea base dificulta el trazo de la tangente para el caso del PETe, lo cual provoca una variación en los resultados de las tres mediciones y a su vez una desviación estándar ligeramente alta.

La diferencia entre los valores promedio de los dos materiales, podría deberse a que el PETe, al ser de grado extrusión, tiene peso molecular mayor, lo cual disminuye la facilidad de movimiento de las cadenas como consecuencia de la reducción del volumen libre entre ellas.

En la Figura 3.9 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al tercer calentamiento para la determinación de la temperatura de transición vítrea del PBT.

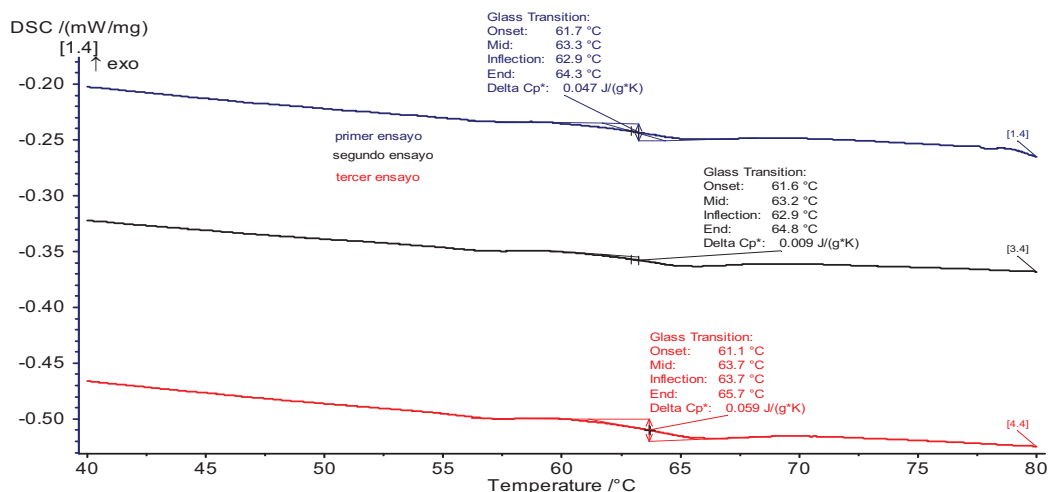


Figura 3.9. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PBT

En el caso del PBT la Tg promedio fue de $63,4 \pm 0,3$ °C. Como se puede observar, las curvas presentan una línea base estable antes y después de la transición, lo cual permitió establecer claramente las temperaturas onset y final extrapoladas y a su vez el trazo de la tangente para el cálculo de la temperatura.

En la Figura 3.10 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al tercer calentamiento para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PA6. La temperatura de transición vítrea promedio fue de $58,8 \pm 0,3$ °C. y como se observa, para este material el cambio de la pendiente en cada curva fue muy sutil en comparación con los casos anteriores, lo cual podría deberse a la sensibilidad del equipo utilizado en el análisis a bajas temperaturas o a la constitución misma del material; sin embargo la variación en el cálculo de Tg fue pequeña.

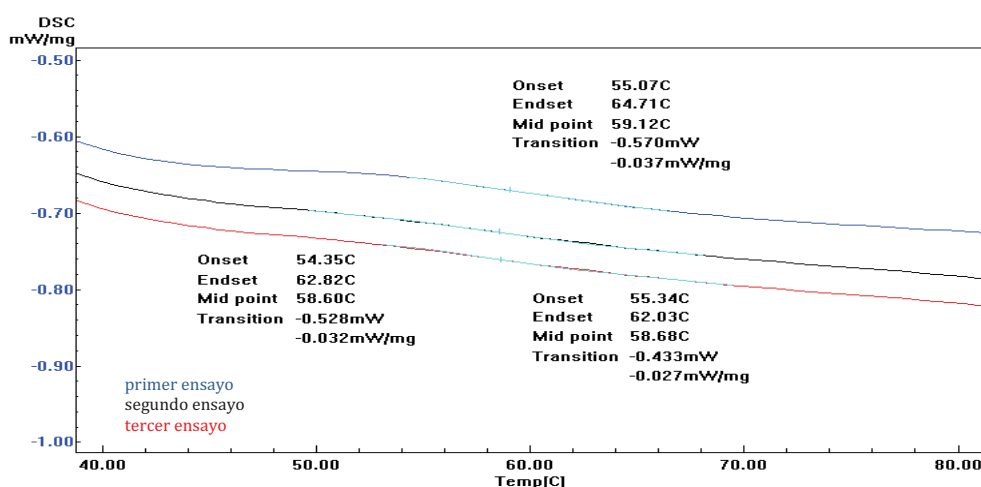


Figura 3.10. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PA6

En la Tabla 3.8 se muestra una comparación entre los valores promedio experimentales y los reportados en bibliografía de la temperatura de transición vítrea.

Tabla 3.8. Valores experimentales y bibliográficos de temperatura de transición vítrea de los materiales puros

MATERIAL	TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA (°C)	
	EXPERIMENTAL	BIBLIOGRÁFICA
PET _b	82,3 ± 0,4	60-90 ^a
PET _e	87,6 ± 1,2	
PBT	63,4 ± 0,3	45-60 ^b
PA6	58,8 ± 0,3	45-60 ^c

$\bar{x} \pm \sigma$ (n = 3)

^a(Andrews y Grulke, 1999, p. 253); ^b(Ehrenstein et al., 2004, p. 334); ^c(Kaisersberger y Mohler, 2010, p.13)

Los valores de temperatura de transición vítrea obtenidos experimentalmente se encuentran dentro de los rangos bibliográficos con excepción del PBT. Este material se encuentra reforzado con un 15 % de fibra de vidrio, la cual podría ser la causa de la disminución del volumen libre entre las cadenas del polímero, lo que provocó el aumento en su T_g.

c) Temperatura de fusión y calor de fusión

En la Figura 3.11 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al segundo calentamiento para la determinación de la temperatura y calor de fusión del PETb y PETe:

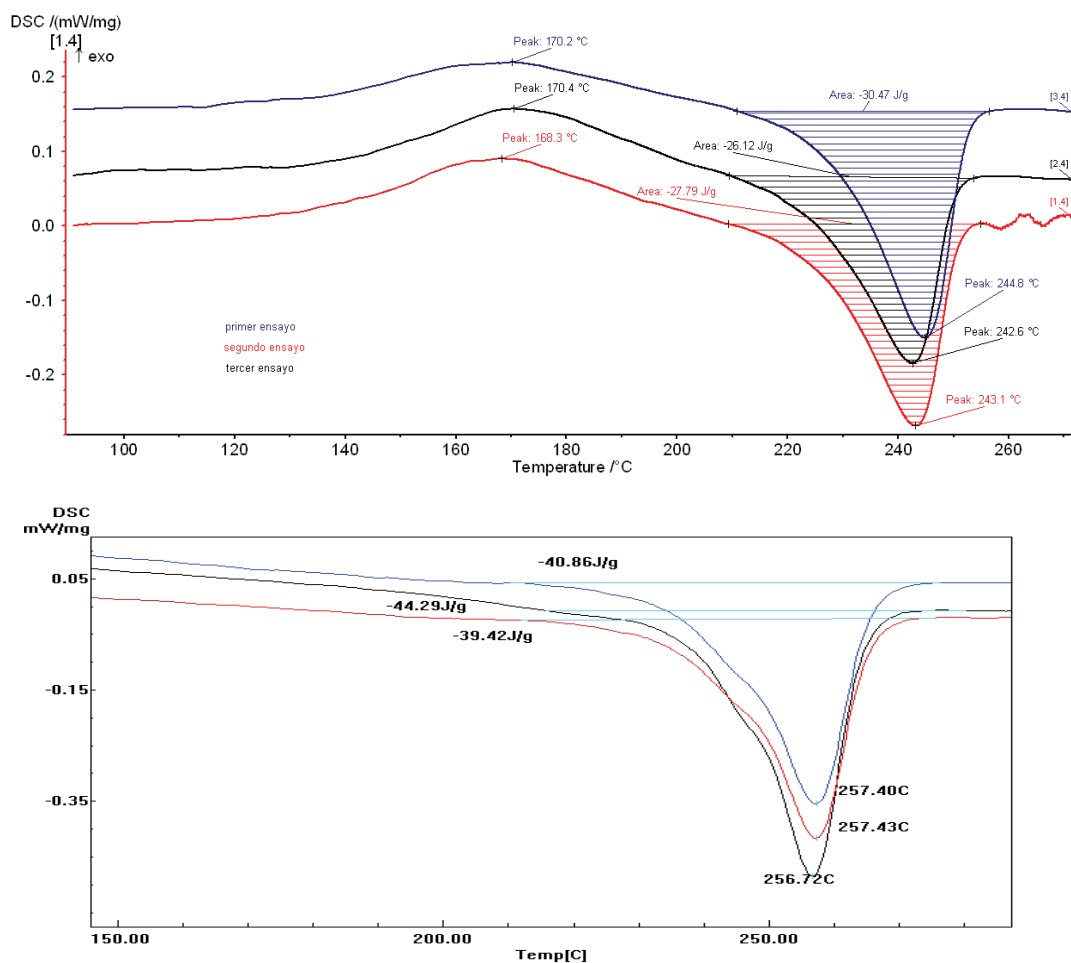


Figura 3.11. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PETb (gráfico superior) y PETe (gráfico inferior)

Como se aprecia en los termogramas de PETb, existe una cristalización en frío que es consecuencia del primer enfriamiento, el cual impidió los movimientos moleculares y ocasionó que no fuera posible la cristalización. Al calentar nuevamente el polímero por encima de su T_g , las cadenas tuvieron suficiente movilidad para cristalizar a temperaturas por debajo de su punto de fusión, efecto que se manifestó mediante el pico exotérmico en la curva DSC. La temperatura y

calor de fusión promedio fueron de $243,5 \pm 1,2$ °C y $-27,96 \pm 2,3$ J/g, éste último valor corresponde a la energía necesaria para fundir los cristales formados durante la cristalización en frío y los previamente existentes.

En el caso de PETe, cuyos termogramas se encuentran en el gráfico superior de la Figura 3.11, se observa que debido a que el material cristalizó durante el primer enfriamiento, tal y como se muestra en el gráfico inferior de la Figura 3.5, no se tuvo una cristalización en frío. La temperatura y el calor de fusión promedio fueron de $257,2 \pm 0,4$ °C y $-41,52 \pm 2,5$ J/g.

Los valores de desviación estándar para los calores de fusión fueron altos debido a que si bien la masa utilizada para cada ensayo estuvo entre 10 y 20 mg, no fue exactamente la misma para todos los casos y a la dificultad para establecer las temperaturas de inicio y final de fusión. Para fijar las temperaturas antes mencionadas se debió analizar detenidamente la línea base antes y después de la transición esperada y si esta no posee una buena estabilidad, pueden surgir variaciones, sobre todo en el cálculo del área del pico de fusión.

Los picos de fusión que se visualizan en ambas figuras, corresponden al de los cristales formados de estructura triclinica característica del PET (Binsack, 1996, p. 50). En cuanto al porcentaje de cristalinidad promedio de cada material, éste fue de 19,97 % para PETb y de 29,66 % para PETe. Estos valores concordaron con los resultados anteriormente mencionados ya que el PETb es más amorfo que el PETe, por lo tanto su cristalinidad es menor.

En la Figura 3.12 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos del segundo calentamiento para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PBT:

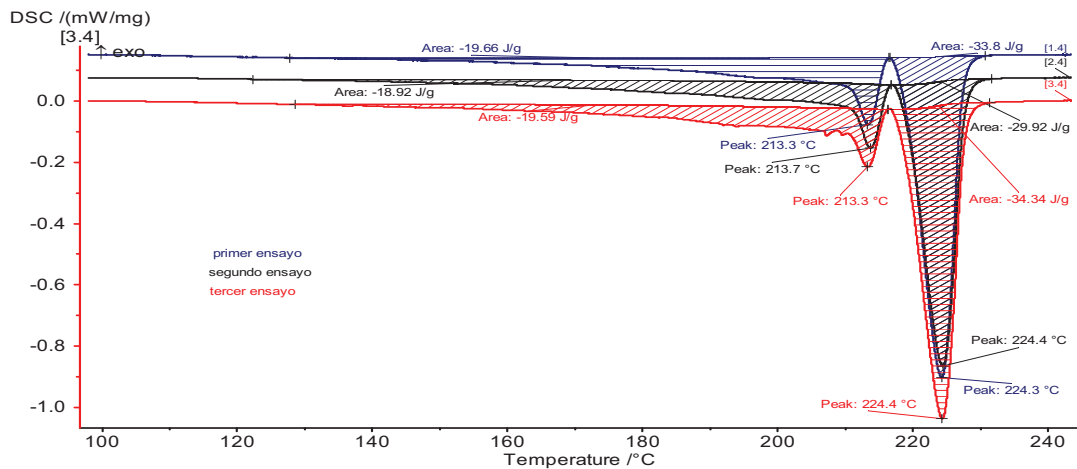


Figura 3.12. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PBT

Los termogramas de fusión de PBT mostraron los picos correspondientes a sus dos formas de cristalización, las cuales pueden transformarse reversiblemente la una en la otra (Calhoun & Peacock, 2006, p. 359). El valor promedio para la forma beta (β) fue $213,4 \pm 0,2$ °C, el de la forma alfa (α) que es la más estable fue de $224,4 \pm 0,1$ y el calor de fusión promedio fue de $-52,08 \pm 2,8$ J/g. La forma de las curvas, sugiere que los tamaños de los cristales fundidos fueron iguales. El porcentaje de cristalinidad promedio fue de 37,20 %, superior a la de los valores obtenidos para el PET, lo que podría ser el resultado de la alta velocidad de cristalización que posee este material.

d) PA6

En la Figura 3.13 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos del segundo calentamiento para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PA6:

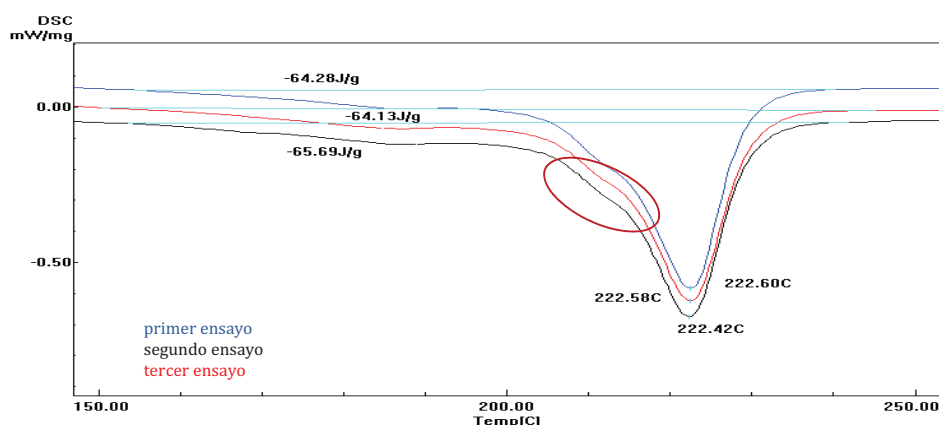


Figura 3.13. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PA6

El valor promedio obtenido de temperatura de fusión fue de $222,5 \pm 0,1$ °C y el calor de fusión promedio fue de $-64,7 \pm 0,9$ J/g. La forma de las curvas indica una distribución ancha en el tamaño de los cristales fundidos y el porcentaje de cristalinidad fue de 28,13 %. En todas las curvas se puede observar la presencia de un pequeño hombro, el cual corresponde a la forma de cristalización gamma (γ), mientras que el pico exotérmico pertenece a la forma alfa (α) que es en la que usualmente cristaliza y es propio del carácter polimorfo de este material (Clark y Xenopoulos, 1995, p. 115).

En la Tabla 3.9 se muestran las temperaturas de fusión promedio y porcentaje de cristalinidad obtenidos experimentalmente y los valores reportados en bibliografía:

Tabla 3.9. Resultados experimentales obtenidos de la determinación de las transiciones térmicas de los materiales puros

MATERIAL	TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C)		CALOR DE FUSIÓN (- Δ H) (J/g)	PORCENTAJE DE CRISTALINIDAD (%)	
	EXP.	*BIBLIOGRÁFICA		EXP.	*BIBLIOGRÁFICA
PETb	243,5 \pm 1,2	240-260	27,96 \pm 2,3	19,97	30-40
PETe	257,2 \pm 0,4		41,52 \pm 2,5	29,66	
PBT	224,4 \pm 0,1	220-230	52,08 \pm 2,8	37,20	40-50
PA6	222,5 \pm 0,1	220-235	64,7 \pm 0,9	28,13	30-40

* (Ehrenstein et al., 2004, pp. 15, 328, 334, 342); $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 3)

Como se puede observar en la Tabla 3.9, los valores experimentales de temperatura de fusión se encontraron dentro de los rangos reportados en bibliografía. El calor de fusión más alto correspondió al de PA6 debido a las interacciones ocasionadas por los enlaces puente hidrógeno formados entre las cadenas del polímero, razón por la cual se necesitó mayor energía para fundir sus estructuras cristalinas (Calhoun y Peacock, 2006, p. 348; Starkweather, 1995, p. 141).

En cuanto al porcentaje de cristalinidad, el mayor valor correspondió al PBT, lo cual podría ser el resultado de la alta velocidad de cristalización que posee este material. Existe una diferencia entre los valores experimentales y los reportados en bibliografía, lo cual podría deberse a que las condiciones establecidas para la realización de los ensayos térmicos en ambos casos no fueron las mismas o para el caso específico del PET, la bibliografía no especifica si el valor reportado corresponde a un material de grado inyección o extrusión; sin embargo los valores experimentales son cercanos al límite inferior para cada rango del material.

3.2 EVALUACIÓN DE LA MISCIBILIDAD DE LAS MEZCLAS DE POLIÉSTERES Y POLIAMIDAS

3.2.1 PREPARACIÓN DE MEZCLAS BINARIAS

En la Figura 3.14 se muestran los reogramas obtenidos de las mezclas del sistema PETb / PBT. Como se puede observar, la mezcla 95 % PETb posee el mayor pico de carga y torque, lo cual significa que se necesitó más fuerza para que al procesar esta mezcla, los rotores giren a las revoluciones establecidas (60 RPM). A la mezcla 50 % PETb le correspondieron los menores valores; sin embargo para esta composición, la línea presenta ruido, efecto que podría deberse a la presencia de la fibra de vidrio en el PBT, la misma que debido a su rigidez, dificulta el mezclado de los materiales. También se puede notar que la mezcla 95 % PETb alcanzó la estabilidad a los 2 minutos de haber sido ingresada a la cámara de mezclado, que es el menor tiempo de todos, a diferencia de las

mezclas 50 % PETb y 20 % PETb que alcanzaron la estabilidad aproximadamente a los 2,5 minutos. Finalmente es importante destacar que a mayor contenido de PBT, el torque necesario para procesar la mezcla fue menor, pero el tiempo en alcanzar la estabilidad y el ruido aumentaron.

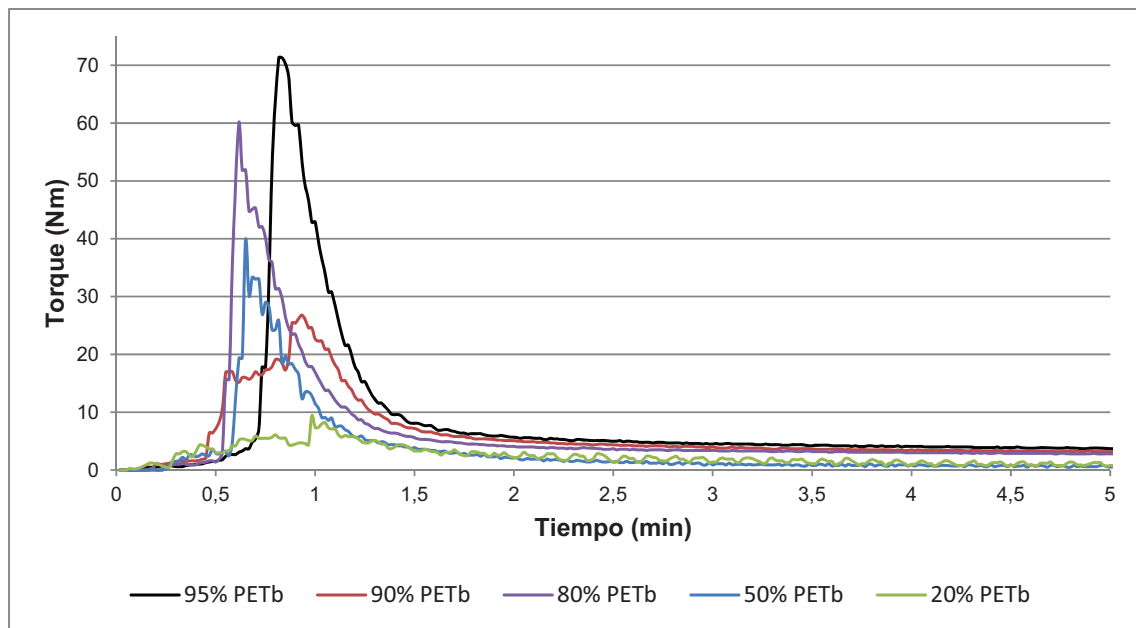


Figura 3.14. Reogramas obtenidos de las mezclas del sistema PETb / PBT

En la Figura 3.15 se muestran los reogramas obtenidos de las mezclas del sistema PA6 / PETe. Se puede observar que a mayor contenido de PA6 aumentó el torque necesario para procesar cada mezcla. Para las composiciones 90 % PA6 y 80 % PA6, la zona de estabilidad fue alcanzada aproximadamente a los 2 minutos de haber sido ingresadas a la cámara de mezclado y con un torque superior, mientras que para las otras dos mezclas restantes fue alcanzada a los 2,5 minutos. Todas las curvas de las mezclas son continuas y no poseen ruido lo que podría deberse a que los materiales no contenían ningún tipo de refuerzo. Este análisis permite entender de mejor manera el comportamiento del sistema estudiado, el mismo que no presenta dificultad para la mezcla de sus componentes en ninguno de los casos.

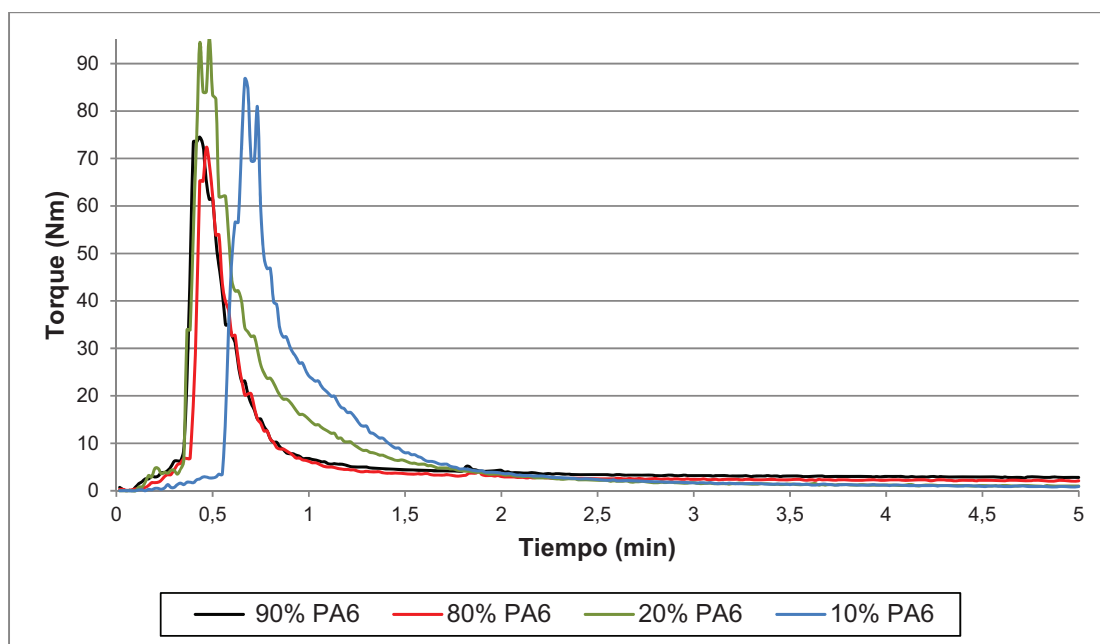


Figura 3.15. Reogramas obtenidos de las mezclas del sistema PA6 / PETe

3.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS TRANSICIONES TÉRMICAS DE LAS MEZCLAS

Sobre la base de los resultados reportados en la Tabla 3.7, Tabla 3.8 y Tabla 3.9, en las cuales se pudo apreciar los resultados de la determinación de las transiciones térmicas, se observó que, en general, la desviación estándar de las mediciones entregadas por los calorímetros fue menor a 1, lo que indicó la confiabilidad y reproducibilidad de los datos. Por esta razón se realizó un solo ensayo para la determinación de las transiciones térmicas de las mezclas y los materiales reciclados

3.2.2.1 Sistema PETb / PBT

a) Temperatura de cristalización

En la Figura 3.16 se muestran los termogramas obtenidos del primer enfriamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 95% PETb, 90 % PETb, 80 % PETb y 50 % PETb. Como se puede observar, existió un máximo exotérmico a los 173,5 °C, 169,1 °C, 167,2 °C y 142,7 °C en las mezclas 95 %, 90 %, 80 % y 50 % respectivamente, estos valores se encontraron entre los reportados para los componentes individuales aunque son más cercanos a los del PETb puro. Se aprecia que la temperatura de cristalización de las mezclas disminuyó conforme se aumentó la cantidad de PBT lo cual se debe, según Avramova (1995), a la alta velocidad de cristalización de este último y al hecho de que sus cristales pueden desempeñar el papel de núcleos para la cristalización del PETb (p. 805).

Everaert et al. (2002), explican que en estas mezclas, existe una cristalización separada entre los componentes, es decir los cristales del componente menor (PBT), se incluyen dentro de las esferulitas del componente principal, lo cual da lugar a un engrosamiento de la textura esferulítica (p. 212). Este efecto se pudo observar en la forma de las curvas DSC, el máximo exotérmico no posee una distribución ancha sino más bien es simétrico lo cual sugiere que el tamaño de los cristales formados es similar.

A excepción de la mezcla 50 % PETb, los gráficos muestran que existió un pequeño hombro en todos los termogramas, lo cual podría ser el resultado de una nucleación provocada por las partículas de fibra de vidrio que posee el PBT.

En la Figura 3.17 se muestra el termograma obtenido del primer enfriamiento del ensayo realizado para la determinación de la temperatura de cristalización de la mezcla 20 % PET. Esta mezcla difiere del comportamiento mostrado en los casos anteriores. Como se aprecia claramente, existieron dos picos de cristalización a 153,7 °C y 176,7 °C, los cuales corresponderían a cada componente. Según

Dangseeyun et al. (2004), este comportamiento podría deberse a que tanto el PETb como el PBT en esta mezcla cristalizaron en fases separadas durante el enfriamiento, y esto a su vez fue consecuencia de las condiciones experimentales (velocidad de enfriamiento, número de barridos, etc) (p. 677). La forma estrecha del pico máximo, sugiere que la cristalización dominante correspondió al PBT, que fue el componente mayoritario.

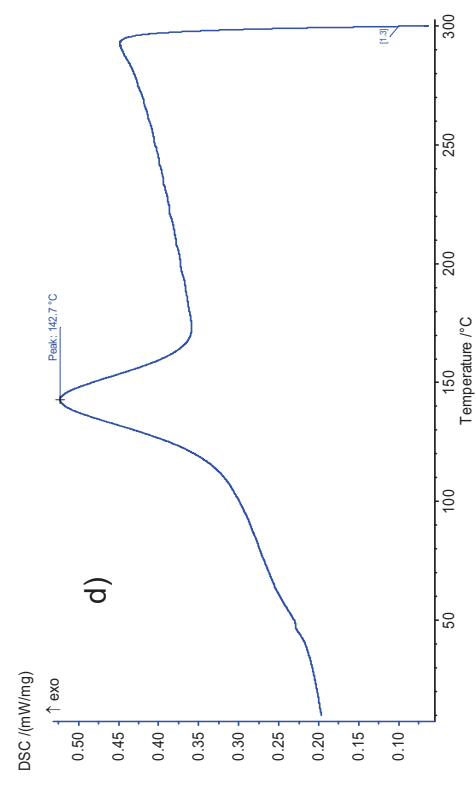
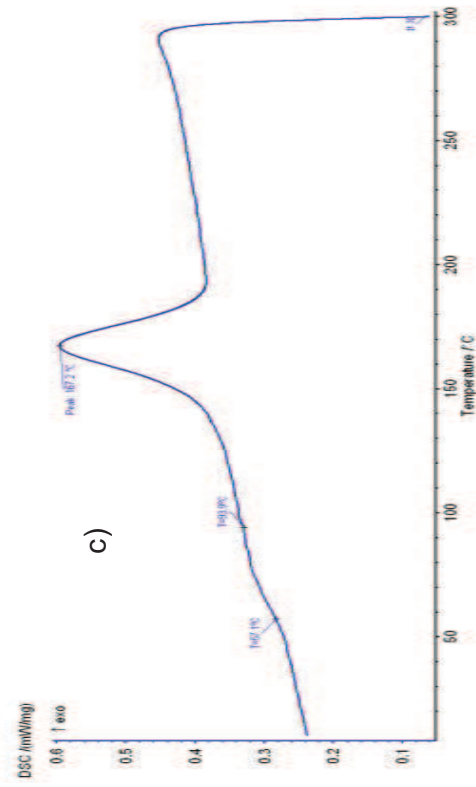
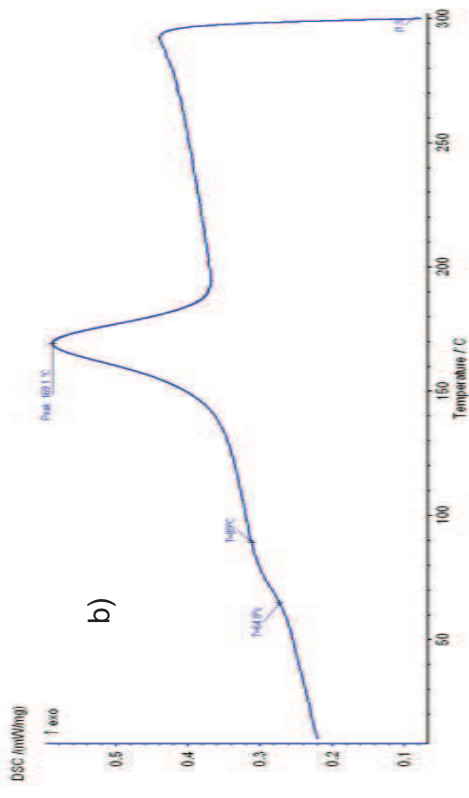
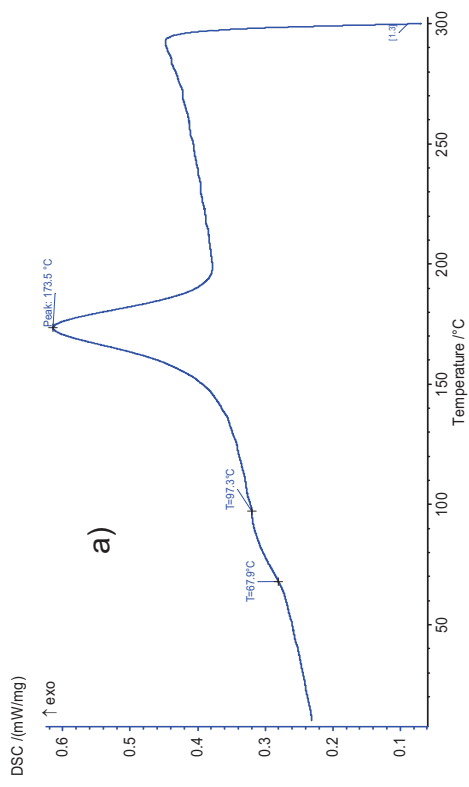


Figura 3.16. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 95% PETb (a), 90 % PETb (b), 80 % PETb (c) y 50 % PETb (d)

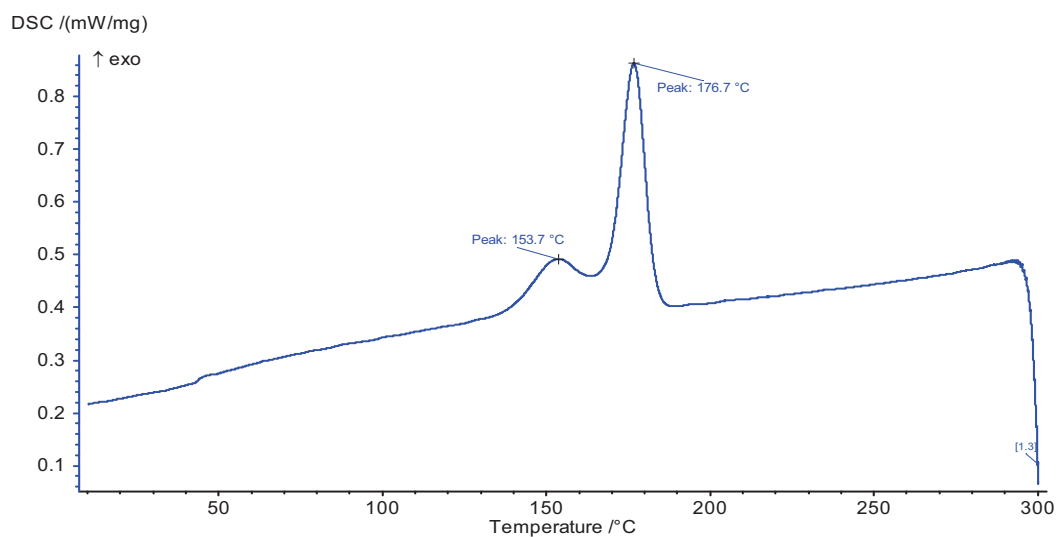


Figura 3.17. Termograma obtenido para la determinación de la temperatura de cristalización de la mezcla 20% PETb

b) Temperatura de Transición Vítrea

En la Figura 3.18 se muestra el termograma obtenido del segundo calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 95 % PETb, 90 % PETb y 80 % PETb.

Como se puede apreciar, la presencia de una sola Tg que varía en función de la composición de la mezcla, sugirió que los componentes fueron miscibles. Con ayuda de la primera derivada de la curva DSC, se estableció un mínimo que, como claramente se aprecia, correspondió a la transición vítrea. Estas temperaturas se encontraron entre las establecidas experimentalmente para los componentes puros.

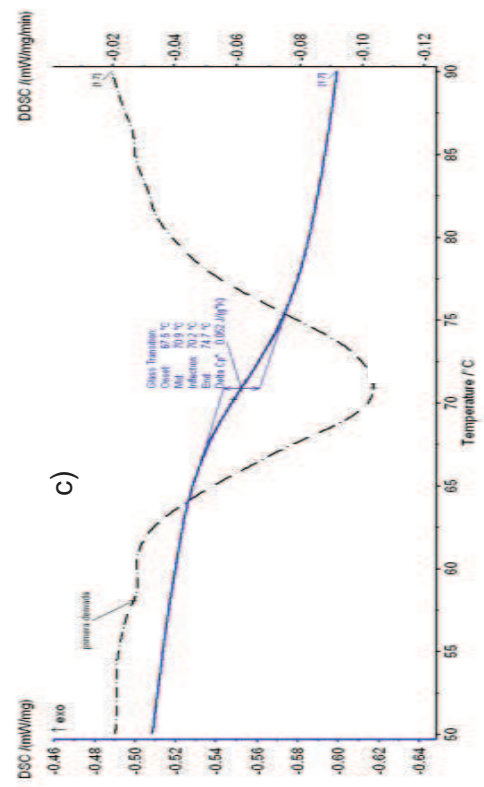
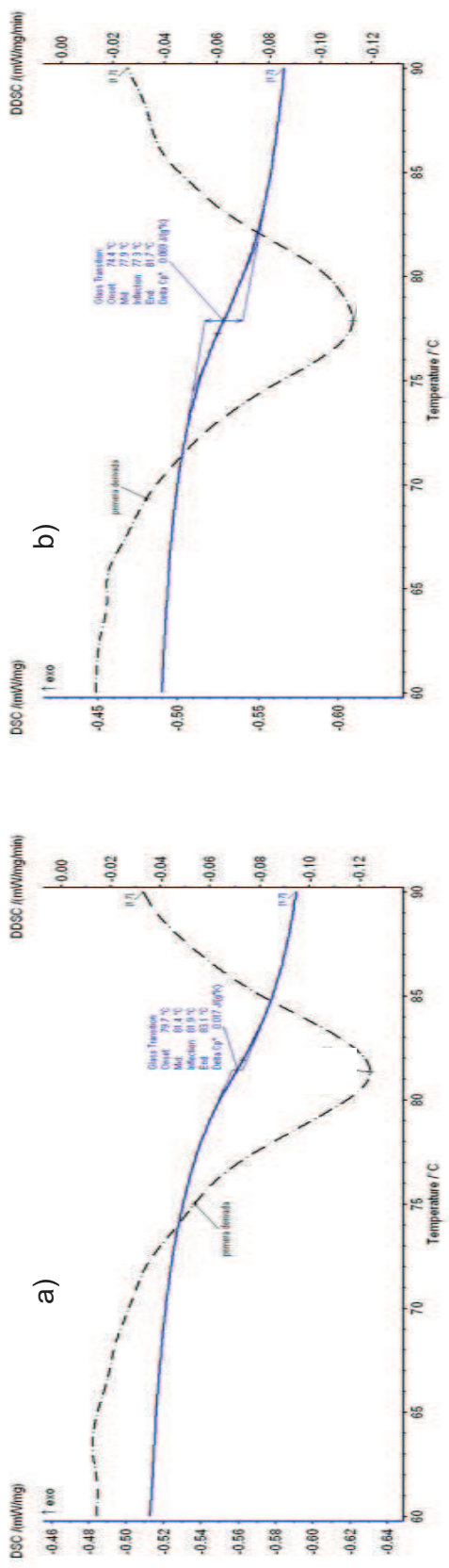


Figura 3.18. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 95% PETb (a), 90 % PETb (b) y 80 % PETb (c)

En la Figura 3.19 se observa el termograma obtenido del segundo calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 50 % PETb y 20 % PETb, los mismos que muestran la aparente existencia de una sola Tg. Para comprobar matemáticamente estos resultados, se utilizó la primera derivada de la curva DSC, en donde claramente se visualiza la presencia de dos mínimos y como consecuencia dos Tgs, lo cual indicó que a dichas concentraciones, los componentes de las mezclas, PETb y PBT fueron inmiscibles.

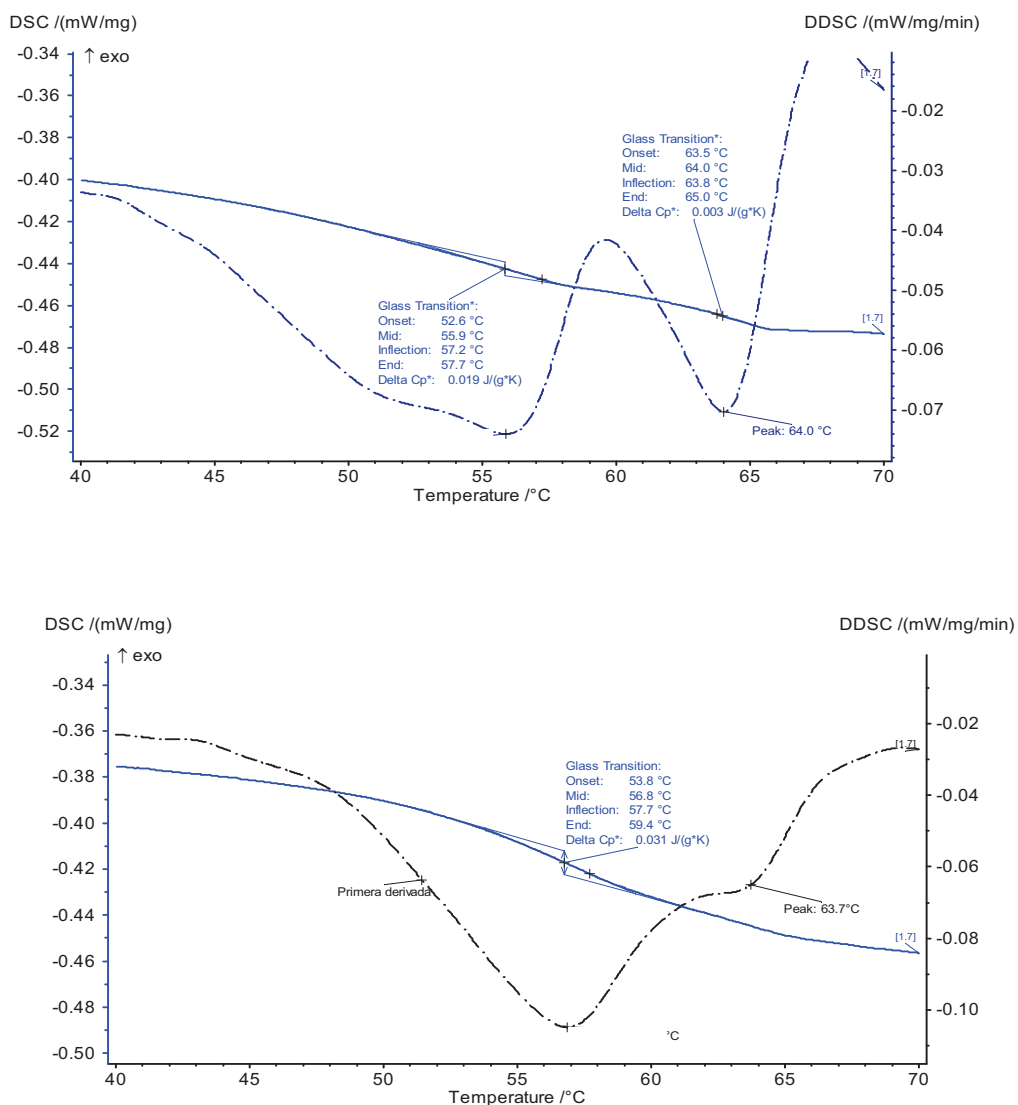


Figura 3.19. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura transición vítrea de las mezclas 50% PETb (superior) y 20 % PETb (inferior)

Para una mejor comprensión del comportamiento de este sistema, en la Figura 3.20 se muestra el gráfico de la temperatura de transición vítrea en función del porcentaje de PETb en la mezcla.

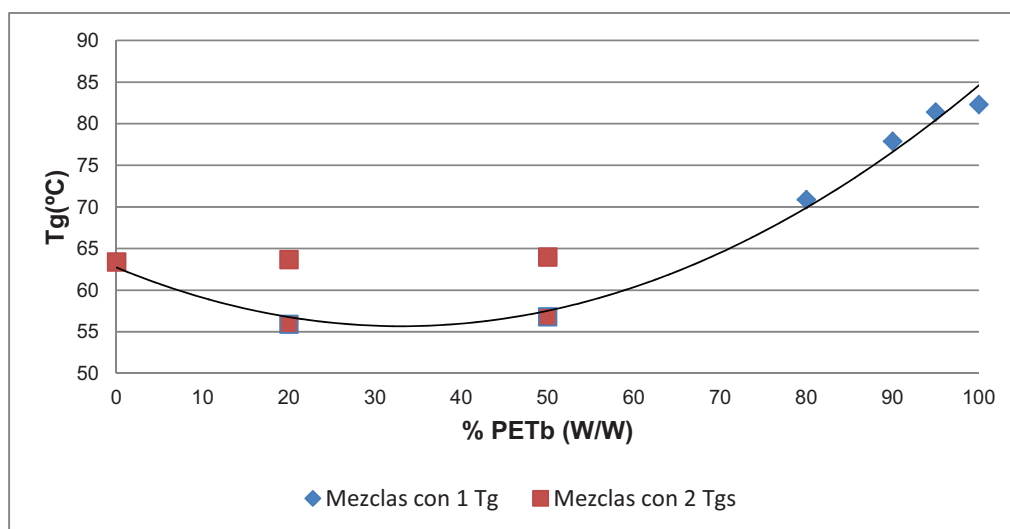


Figura 3.20. Temperatura de transición vítrea en función del porcentaje de PETb para el sistema PETb - PBT

Como se puede apreciar, las temperaturas de la serie de datos siguen una tendencia clara que indica que existió miscibilidad en las mezclas de composición 50 % PETb y 20 % PETb; sin embargo, a estas mismas concentraciones, la evidencia matemática mostró una Tg correspondiente a los 63,7 °C y a los 64 °C respectivamente, temperaturas cercanas entre sí y a la transición vítrea del PBT puro, lo que sugiere que existe una porción de este componente que no logró formar una sola fase con el PETb a las condiciones de temperatura y velocidad de los rotores utilizados para preparar las mezclas. Esto también podría ser el resultado de la interferencia provocada por la presencia de la fibra de vidrio.

Para comprobar los datos experimentales con la teoría, se graficaron los valores correspondientes a las mezclas que fueron completamente miscibles, es decir de las mezclas 95 %, 90 % y 80 % PETb con los obtenidos de la ecuación de Fox, como se muestra en la Figura 3.21.

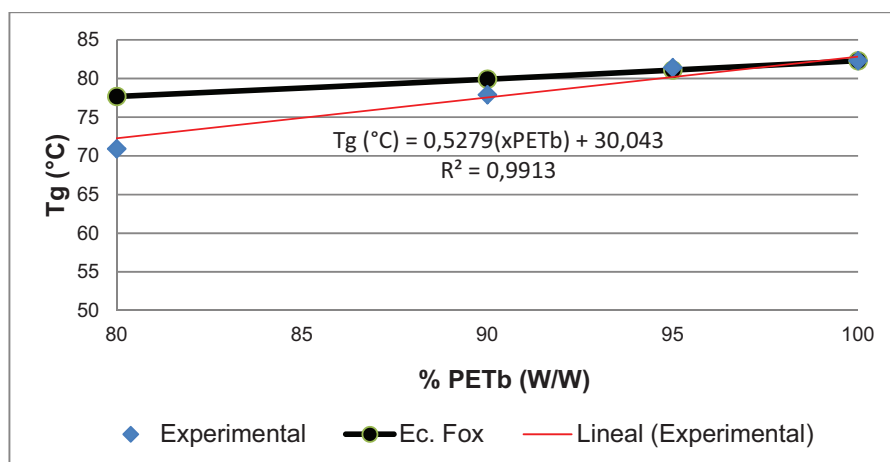


Figura 3.21. Comparación entre los datos experimentales y los obtenidos de la ecuación de Fox para la temperatura de transición vítrea del sistema PETb-PBT

La Figura 3.21 muestra que las temperaturas de transición vítrea de las mezclas que fueron completamente miscibles tuvieron una tendencia lineal; sin embargo, presentaron una desviación con respecto a los datos obtenidos de la ecuación de Fox. En la Tabla 3.10 se observa el error encontrado entre estos dos valores.

Tabla 3.10. Comparación entre la temperatura de transición vítrea teórica y experimental de las mezclas 95 % PETb, 90 % PETb y 80 % PETb

% PETb	Tg EXPERIMENTAL (°C)	Tg TEÓRICA (°C)	ERROR (%)
95	81,4	81,1	0,4
90	77,9	79,9	2,5
80	70,9	77,7	8,7

Los valores reportados en la Tabla 3.10 indican que el error entre las temperaturas experimentales y teóricas, aumentó con la cantidad de PBT en la mezcla. La diferencia entre las temperaturas podría deberse principalmente a la fibra de vidrio presente en el PBT, debido a que ésta altera el comportamiento de la Tg en las mezclas, además la ecuación de Fox permite la predicción de las propiedades de las mezclas en función de la de los componentes puros y no toma en cuenta las posibles interacciones que podrían darse entre los mismos (Brostow, Chiu, Kalogeras y Vassilikou-Dova, 2008, p. 3153).

a) Temperatura de Fusión y Calor de Fusión

En la Figura 3.22 se muestran los termogramas obtenidos del segundo calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas 95 % PETb, 90 % PETb y 80 % PETb.

Los termogramas muestran la existencia de un solo pico de fusión para todos los casos, cuyo valor descendió con el aumento de PBT. Esto podría deberse a que el contenido del componente disperso en la matriz del otro componente no es suficiente para formar su propia fase cristalina, aunque es suficiente para afectar a la transición vítrea y el proceso de cristalización del PETb.

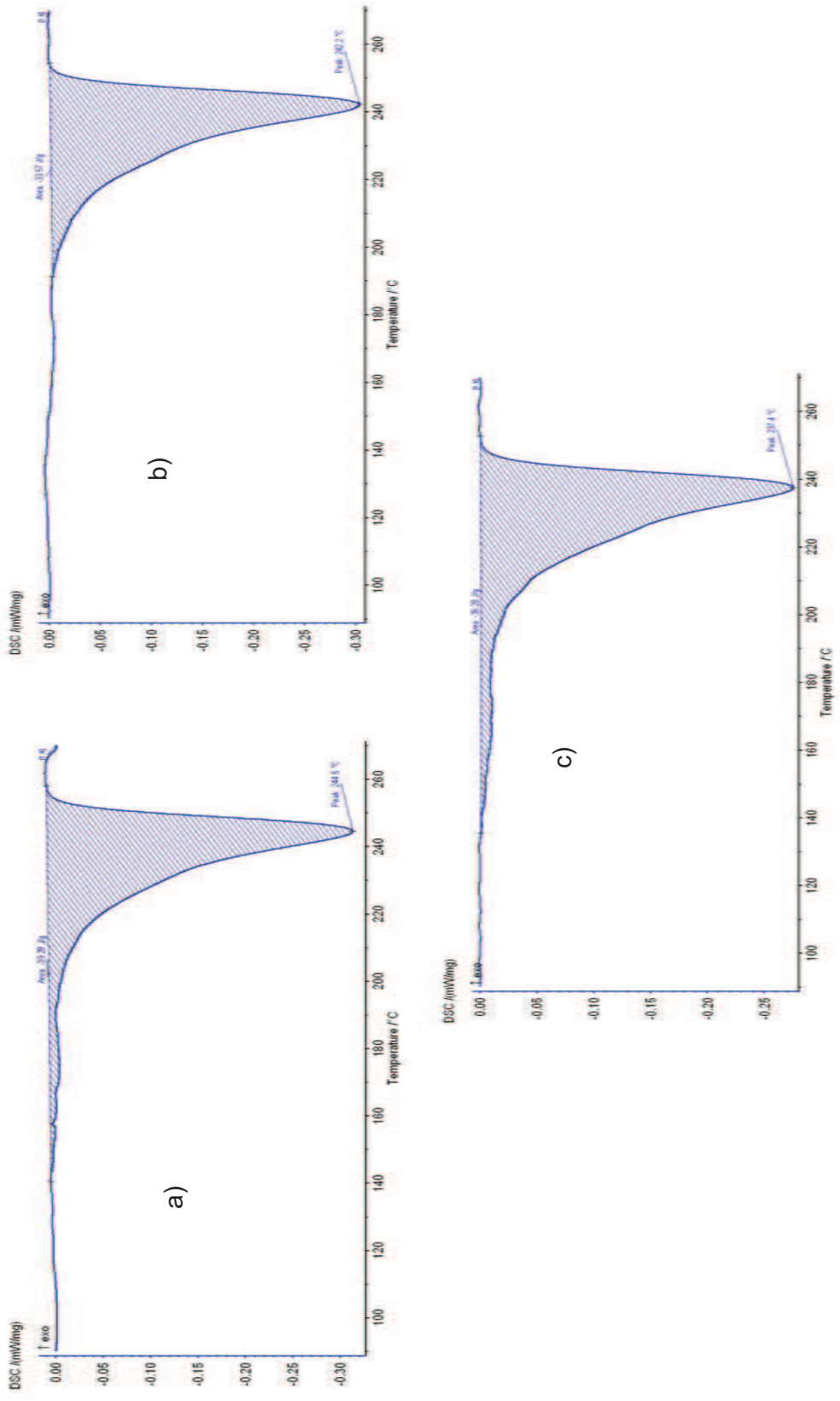


Figura 3.22. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas 95 % PETb (a), 90 % PETb (b) y 80 % PETb (c)

En la Figura 3.23 se muestran los termogramas obtenidos del segundo calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas 50 % PETb y 20 % PBT

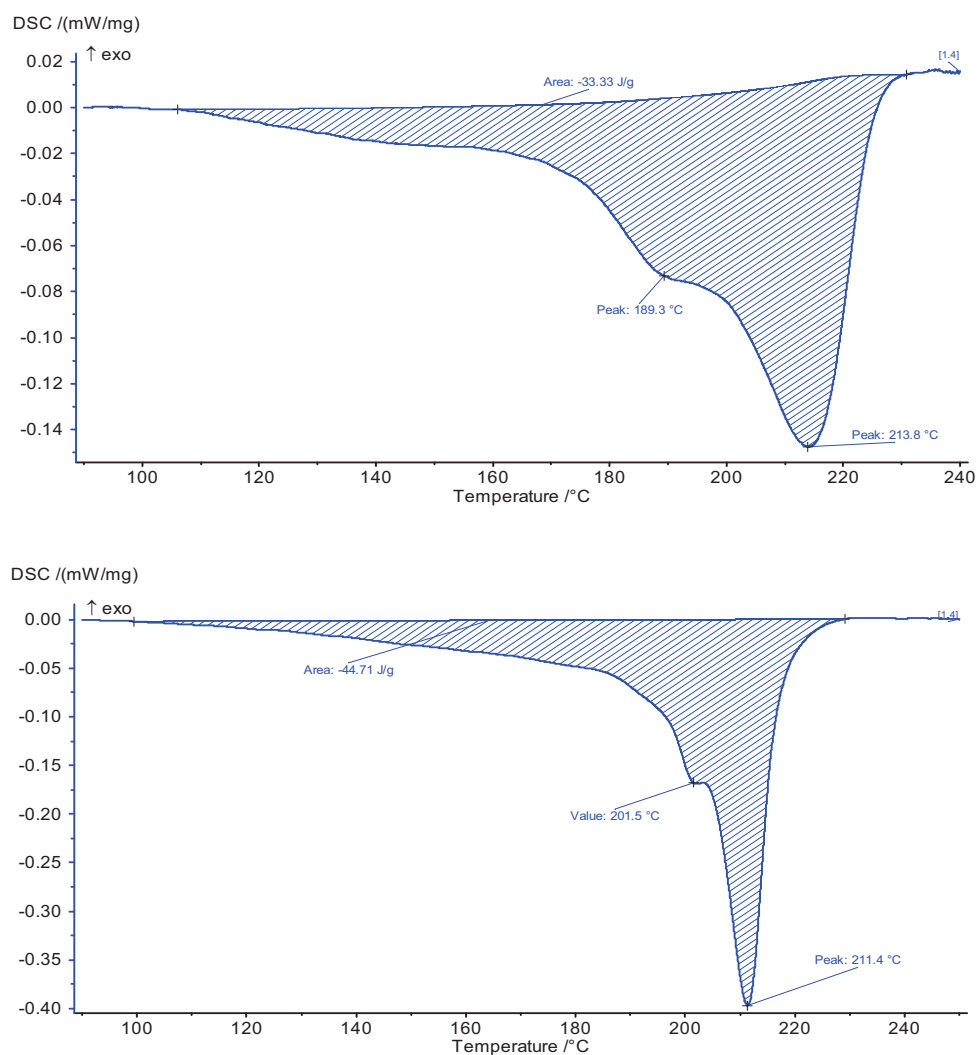


Figura 3.23. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión las mezclas 50 % PETb (superior) y 80% PETb (inferior)

La Figura 3.23 indica la presencia de dos picos de fusión para ambas composiciones, los mismos que corresponderían a cada uno de los componentes de la mezcla. Se aprecia que la temperatura de fusión del PETb disminuyó con el aumento de PBT y viceversa, comportamiento que se observa con mayor claridad en la Figura 3.24:

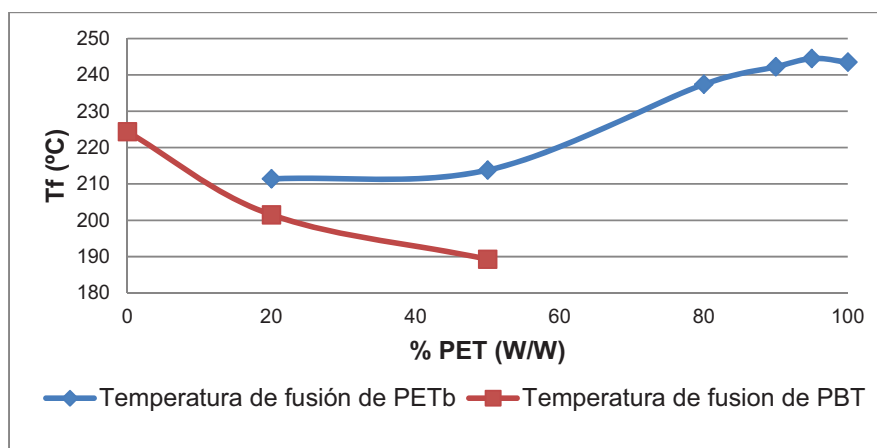


Figura 3.24 Temperatura de fusión de las mezclas PETb - PBT en función de la composición

La disminución en la temperatura de fusión de las mezclas es el resultado de efectos morfológicos, cinéticos y termodinámicos. Casi invariablemente, la temperatura de fusión de un homopolímero semicristalino se ve reducida al formar una mezcla miscible. Al realizar los ensayos DSC se da lugar a una posible transesterificación y sucesivos calentamientos, razones que también podrían explicar dicho comportamiento (Avramova, 1995, p. 805).

En la Tabla 3.11 se muestran los calores de fusión de cada una de las mezclas del sistema PETb - PBT:

Tabla 3.11. Calores de fusión de las mezclas del sistema PETb – PBT

MEZCLA (W/W)	CALOR DE FUSIÓN $-\Delta H$ (J/g)
100 % PETb – 0% PBT	27,96
90 % PETb – 10% PBT	33,57
80 % PETb – 20% PBT	36,28
50 % PETb – 50% PBT	33,33
20 % PETb – 80% PBT	44,71
0 % PETb – 100% PBT	52,08

El calor de fusión de manera indirecta muestra el grado de cristalinidad de una sustancia. Los valores de la tabla anterior indican que para las mezclas 95 % PETb, 90 % PETb y 80 % PETb, que son completamente miscibles, la fase

dispersa aumentó el calor de fusión del componente mayoritario en un 41 %, 20 % y 30 % respectivamente y como consecuencia su cristalinidad. De estas tres mezclas, la que posee el 95 % PETb fue la de mayor calor de fusión. Este efecto no se observó en las mezclas 50 % PETb y 20 % PETb, que no son totalmente miscibles, en las cuales el PBT, sustancia en mayor proporción, disminuyó su calor de fusión.

3.2.2.2 Sistema PA6 / PETe

- **Temperatura de cristalización**

En la Figura 3.25 se muestran los termogramas obtenidos del primer calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 90 % PA6, 80 % PA6, 20 % PA6 y 10 % PA6. Los termogramas de indican un solo máximo en las mezclas 90 % PA6 y 80 % PA6, en 186,9 °C y 184,6 °C respectivamente. Estos valores corresponderían a la cristalización del PA6 que es el componente mayoritario. Para estas concentraciones, la variación entre las temperaturas encontradas fue de solamente de 2 °C y son superiores a las de PA6 puro, cuyo valor fue de $177,9 \pm 0,5$ °C. Una razón para este incremento podría ser que el PETe actuó como agente nucleante de la poliamida y ocasionó un cambio en la morfología. Se observa también que la mezcla 90 % PA6 presentó una distribución más estrecha en cuanto a los tamaños de los cristales formados.

En cuanto a las mezclas 20 % PA6 y 10 % PA6, sus temperaturas de cristalización fueron de 184,3 °C y 185,5 °C respectivamente. Los termogramas muestran la existencia de dos máximos en ambas composiciones. Para estas mezclas tanto el PETe como PA6 actuarían como agentes nucleantes el uno del otro y como se observa, el componente mayoritario cristalizó en más proporción. La mezcla 10 % PA6 presenta una distribución más ancha en cuanto a los tamaños de los cristales formados, esto podría deberse a la diferencia en la tasa

de enfriamiento, la cual no pudo ser constante por la configuración del equipo usado.

En la Figura 3.26 se muestra las variaciones de las temperaturas de cristalización de los componentes de las mezclas analizadas.

Como se observa en la Figura 3.26, la variación de la temperatura de cristalización de la PA6 en las mezclas fue mínima con respecto a su valor en estado puro y el pico de cristalización estuvo presente en todas las mezclas, mientras que en el caso del PETe, su máximo solo fue visible a altas concentraciones del mismo.

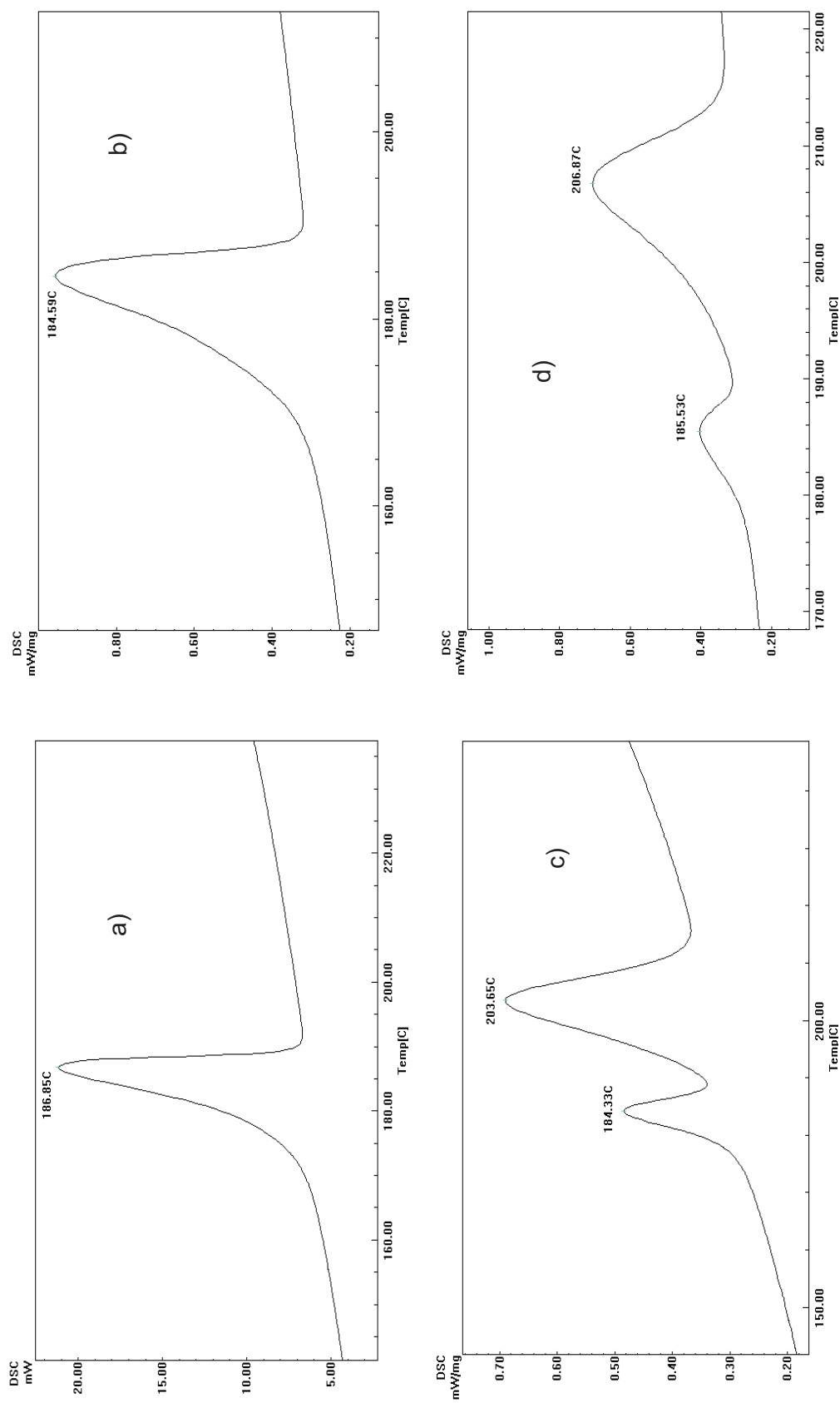


Figura 3.25. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas (a) 90% PA6, (b) 80 % PA6, (c) 20 % PA6 y (d) 10 % PA6

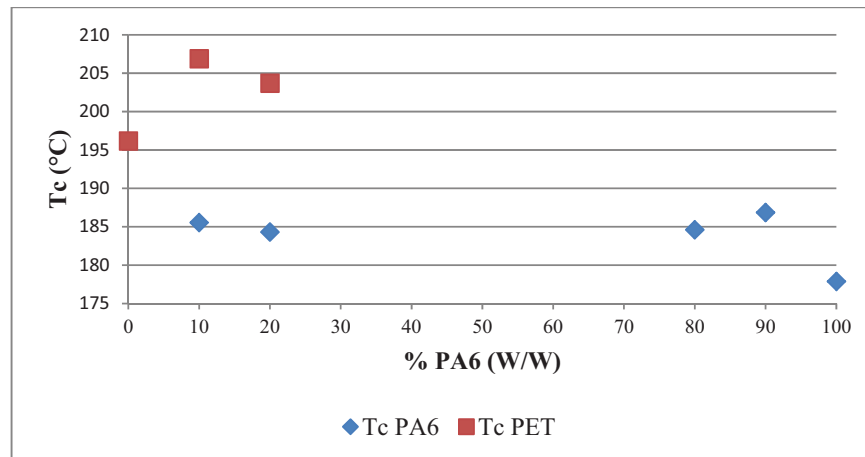


Figura 3.26. Variación de las temperaturas de cristalización en las mezclas del sistema PA6 / PETe

- **Temperatura de Transición vítrea**

En la Figura 3.27 se muestran los termogramas obtenidos del tercer calentamiento para la determinación de la transición vítrea de las mezclas del sistema PA6 / PETe.

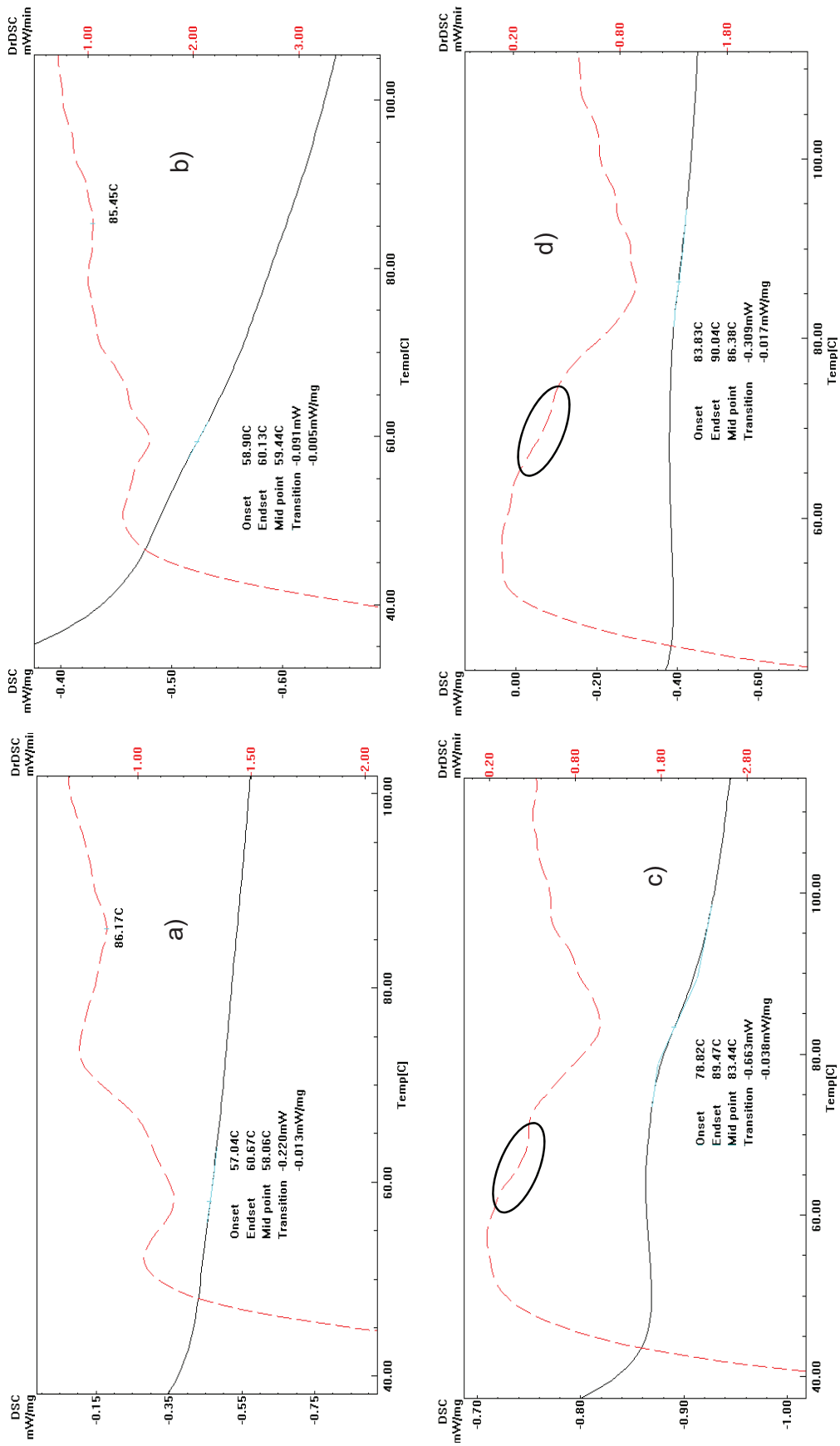


Figura 3.27. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas (a) 90% PA6, (b) 80 % PA6, (c) 20 % PA6 y (d) 10 % PA6

Como se puede observar, en las mezclas 90 % PA6 y 80 % PA6, la derivada de la curva DSC mostró la existencia de dos transiciones vítreas correspondientes a cada uno de los componentes, lo cual es indicador de su inmiscibilidad.

Para las mezclas 20 % PA6 y 10 % PA6, aunque el termograma y la evidencia matemática mostraron la existencia de una sola transición vítrea, se puede notar que la curva DSC presentó puntos de inflexión alrededor de los 63 °C para la composición 20 % y 64 °C para la de 10 %, temperaturas próximas a la transición vítrea de PA6 puro, cuyo valor fue de $58,8 \pm 0,3$ °C. Para estas mezclas la cantidad de PETe es mucho mayor a la del otro componente, razón por la cual el equipo no detecta de manera satisfactoria la presencia de la poliamida.

La variación de la temperatura de transición vítrea de los componentes en las mezclas del sistema PA6 / PET se aprecia de mejor manera en la Figura 3.28.

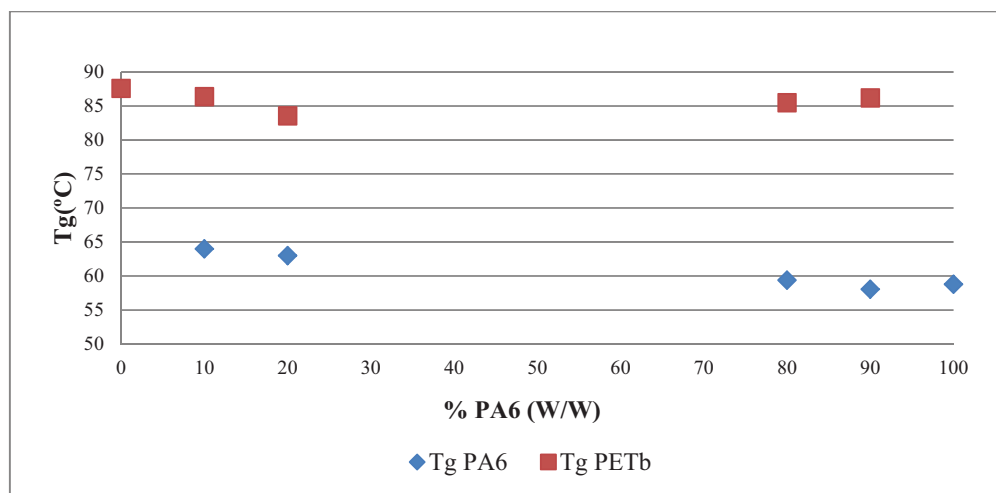


Figura 3.28. Variación de la temperatura de transición vítrea en las mezclas del sistema PA6 / PETe

Las gráficas de la Figura 3.28 indican que en este sistema inmisible, las temperaturas de transición vítrea de los componentes puros no variaron sustancialmente al formar parte de las mezclas.

- **Temperatura y calor de fusión**

En la Figura 3.29 se muestran los termogramas del segundo calentamiento obtenidos para la determinación de las temperaturas y calor de fusión de las mezclas del sistema PA6 / PETe.

Los termogramas de la Figura 3.29 indican que en todas las mezclas existieron dos picos de fusión y el área de los mismos varió con la cantidad de los componentes.

En la Figura 3.30 se muestra de mejor manera el comportamiento del sistema PA6- PETe en cuanto a sus temperaturas de fusión. Las temperaturas de fusión de los componentes de las mezclas tuvieron una variación despreciable con respecto a los valores encontrados al estar en estado puro, cuyo valor fue de $222,5 \pm 0,1$ °C para PA6 y $257,2 \pm 0,4$ °C para PETe, lo cual indica que cada constituyente formó su propia fase cristalina independientemente de su concentración en la mezcla.

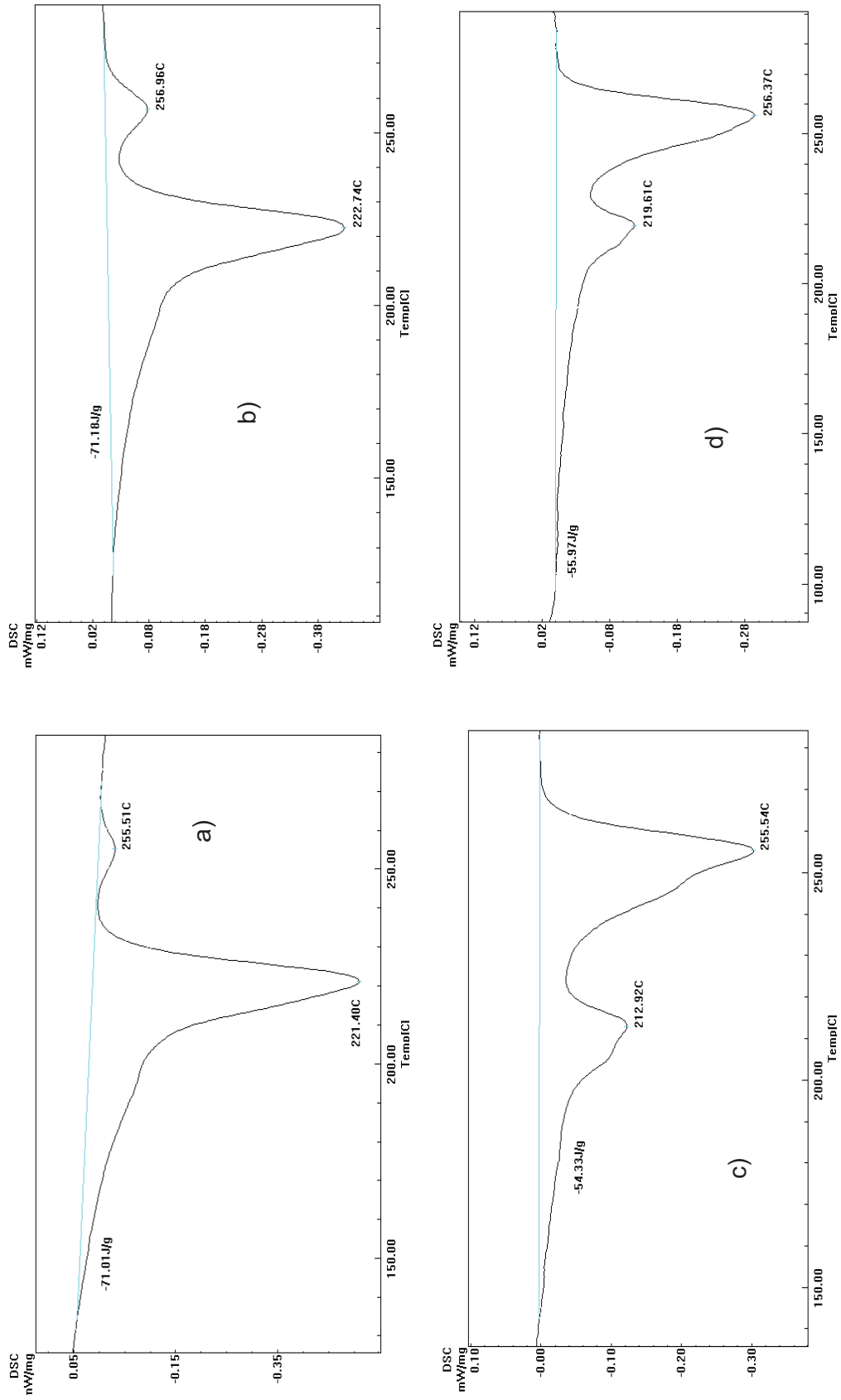


Figura 3.29. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas (a) 90% PA6, (b) 80 % PA6, (c) 20 % PA6 y (d) 10 % PA6

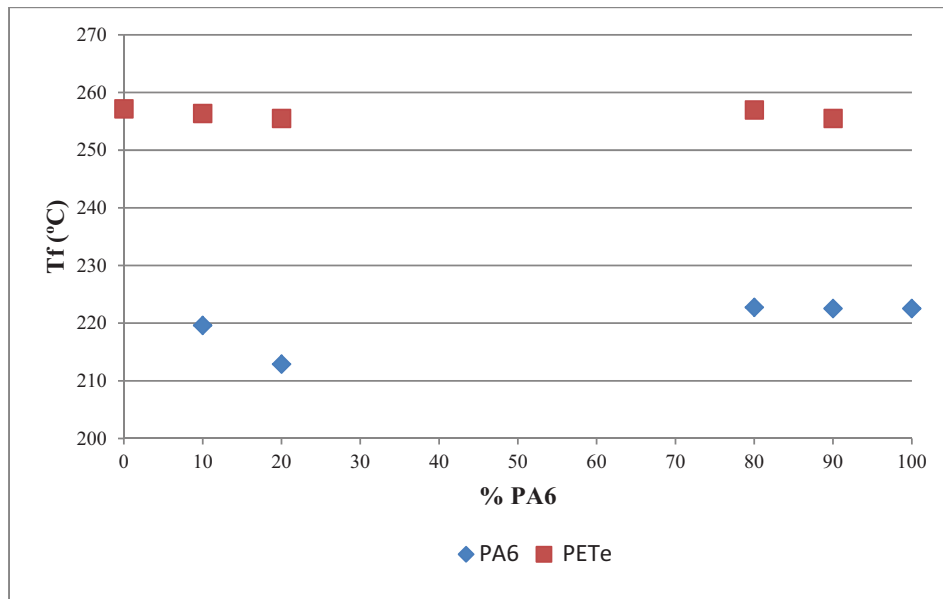


Figura 3.30. Temperaturas de fusión del sistema PA6/PETe

Los calores de fusión de las mezclas del sistema PA6 / PETe se resumen en la Figura 3.31

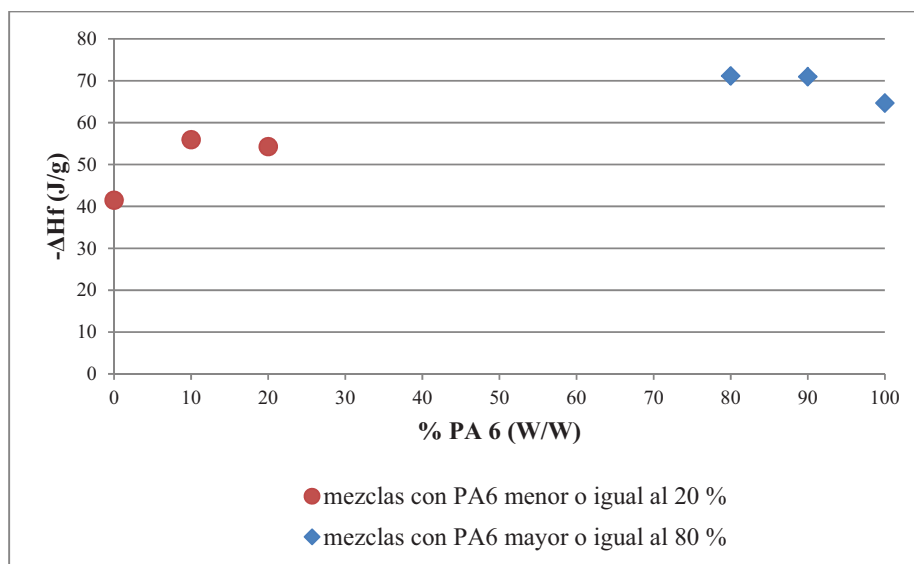


Figura 3.31. Calores de fusión del sistema PA6/PETe

La Figura 3.31 muestra que el calor de fusión no varió con la composición de la mezcla pero si fue función del componente mayoritario de la misma. En los puntos de color azul que corresponden a las mezclas en las cuales PA6 estuvo en mayor proporción, se apreció un aumento desde su valor en estado puro para luego

mantenerse en aproximadamente -71 J/g. En el otro caso, en el cual el PETe fue el predominante, se observó un aumento hasta -55 J/g. Estas tendencias que según Dhar y Varma (1997), deberían continuar hasta una concentración 50/50, en donde la nucleación será máxima, indican la separación entre las fases en las mezclas y confirman la inmiscibilidad del sistema (p. 1123).

3.2.3 EVALUACIÓN DEL MEZCLADO DISPERSIVO Y DISTRIBUTIVO

3.2.3.1 Probetas estándar

En la Figura 3.32 se muestran las probetas estándar obtenidas para la evaluación del mezclado distributivo y dispersivo.

En la Tabla 3.12 se muestran los valores cuantitativos de la dispersión y distribución de las probetas estándar. Estos datos fueron obtenidos de las probetas mostradas en la Figura 3.32.

Tabla 3.12. Valores cuantitativos de la distribución y dispersión de las probetas estándar

ESTÁNDAR	DISTRIBUCIÓN		DISPERSIÓN	
	CUADROS CON PIGMENTOS	PORCENTAJE (%)	CUADROS CON MAYOR NÚMERO DE PIGMENTOS	PORCENTAJE (%)
a	20	20	6	30
b	37	37	27	73
c	80	80	45	56
d	>80	>80	>45	>73

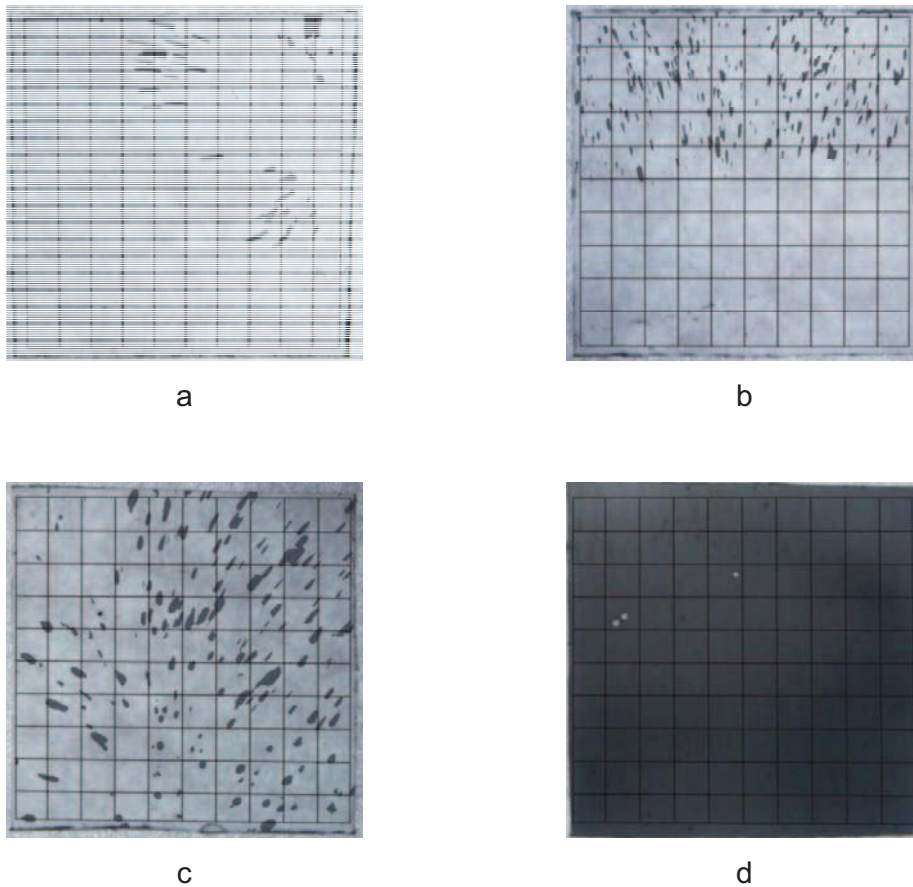


Figura 3.32. Probetas estándar de mezclado con mala distribución y mala dispersión (a), mala distribución y buena dispersión (b), buena distribución y mala dispersión (c), buena distribución y buena dispersión (c)

3.2.3.2 Probetas de mezclas

a) Sistema PETb / PBT

En la Figura 3.33 se muestran las probetas obtenidas del sistema PETb / PBT. En todos los gráficos se puede observar la presencia de burbujas, lo cual se debió principalmente al aire retenido entre los pedazos de la mezcla que fueron colocados entre las placas del molde y luego prensados. Conforme aumentó la cantidad de PBT dispersa, el color se tornó más oscuro. La probeta correspondiente a la mezcla 20 % PETb tuvo una cierta tonalidad amarilla debido a la dificultad que presentó para ser desprendida del molde, lo cual provocó la

adherencia de ciertas partículas superficiales; sin embargo, para todos los casos se aprecia que hay un buen mezclado dispersivo y distributivo a nivel macroscópico ya que no se puede diferenciar a simple vista la presencia de dos fases en las probetas.

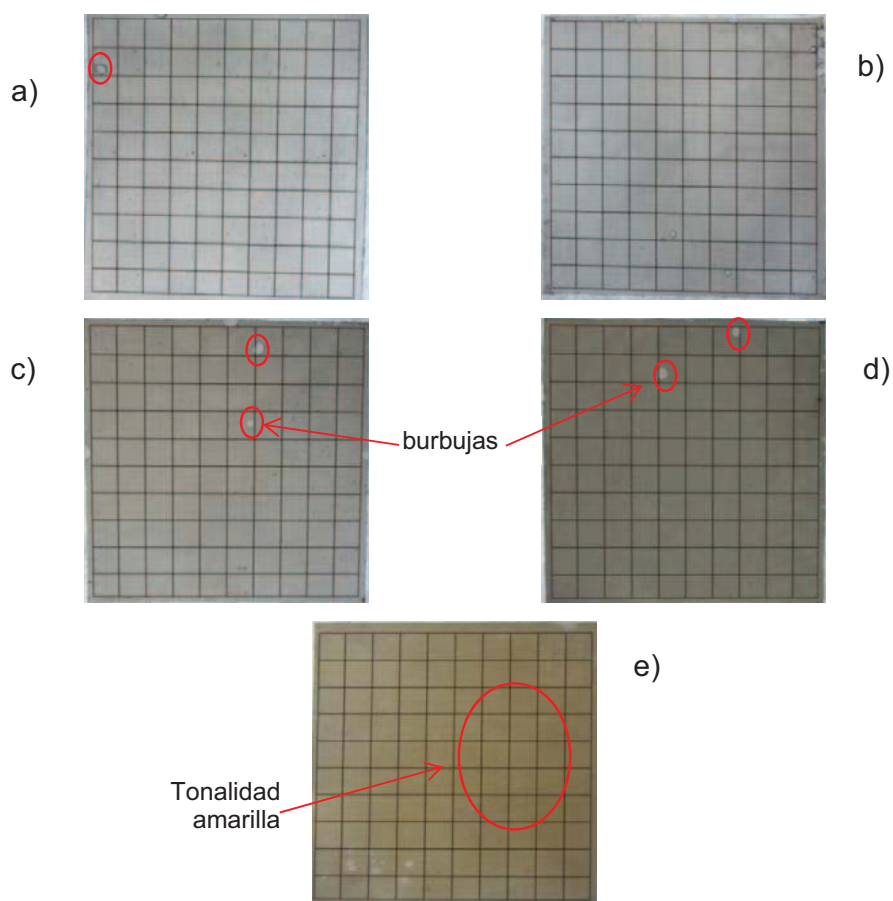


Figura 3.33. Probetas obtenidas de la mezclas del sistema PETb-PBT: a) 95 % PETb, b) 90 % PETb-PBT, c) 80 % PETb, d) 50 % PETb, e) 20 % PETb

b) Sistema PA6 / PETe

En la Figura 3.34 se muestran las probetas obtenidas del sistema PA6 / PETe. Al igual que el sistema anterior, la presencia de burbujas se debió principalmente al aire retenido entre los pedazos de la mezcla. Se observa que existió un buen mezclado dispersivo y distributivo a nivel macroscópico entre los componentes de las mezclas ya que no se puede diferenciar a simple vista la presencia de dos

fases en las probetas. Se aprecia también similitud en el color de las 4 muestras, lo que indica que la cantidad de uno u otros de los componentes, no afectó significativamente la apariencia de la mezcla resultante.

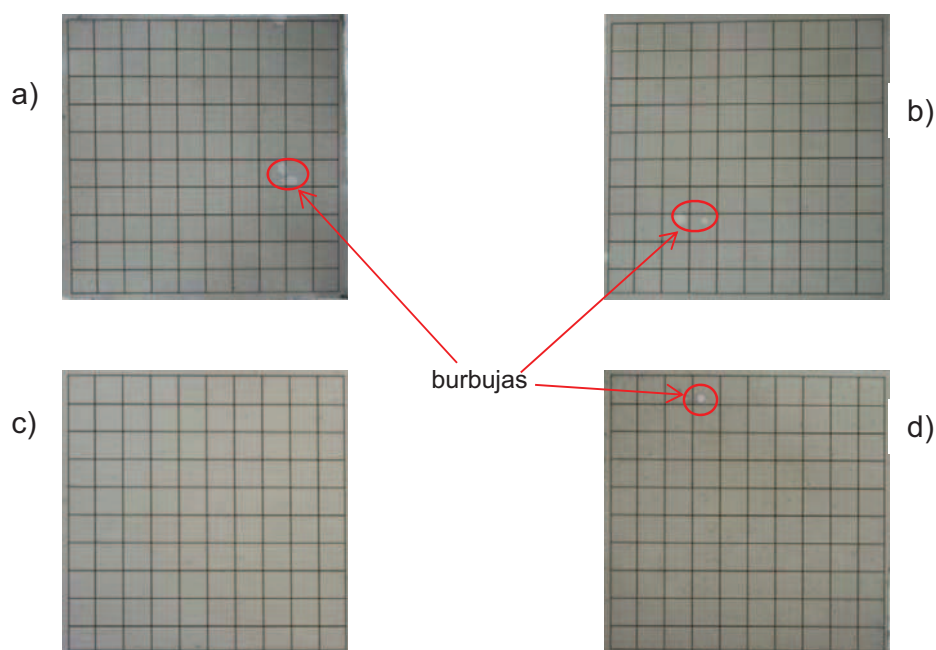


Figura 3.34. Probetas obtenidas del sistema PA6 / PETe: a) 90 % PA6, b) 80 % PA6, c) 20 % PA6 y d) 10 % PA6

3.3 APLICACIÓN DE LAS CONDICIONES DEFINIDAS PARA LA MEZCLA DE POLIÉSTERES Y POLIAMIDAS COMERCIALES A MATERIALES RECICLADOS

3.3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Para la selección de la mezcla a ser validada con materiales reciclados, se analizaron todas las propiedades de las mezclas previamente preparadas, principalmente su temperatura de transición vítrea, la cual es indicador de la miscibilidad entre sus componentes.

El sistema que presentó mezclas con miscibilidad entre sus componentes fue PETb – PBT, específicamente las mezclas 95 % PETb, 90% PETb y 80 % PETb, las cuales mostraron una sola Tg. En la Tabla 3.13 se muestran las propiedades térmicas de estas mezclas así como las de sus componentes en estado puro.

Tabla 3.13. Propiedades térmicas de las mezclas 95 % PETb, 90% PETb y 80 % PETb

MEZCLA	Tg (°C)	Tf (°C)	-ΔHf (J/g)
100 % PETB	82,3	243,5	27,96
95 % PETB	81,4	244,5	39,29
90 % PETB	77,9	242,2	33,57
80 % PETB	70,9	237,4	36,28
0 % PETB	63,4	224,4	52,08

Lo que se buscó principalmente en las mezclas fue que se mejoren las propiedades del componente mayoritario que, para todos los casos fue el PETb. Los datos de la tabla anterior indican que el agregar un 5 % de PBT aumentó el calor de fusión y de manera indirecta la cristalinidad del PETb, lo que resultará en un material con mejores propiedades que en su estado puro. Para esta mezcla, la temperatura de transición vítrea y fusión presentaron valores cercanos a los del componente mayoritario, lo cual significó que el PETb mantuvo sus propiedades originales.

En cuanto a la dispersión y distribución, los resultados de la Figura 3.33, indicaron que macroscópicamente las mezclas no presentaron dos fases y tuvieron una apariencia completamente homogénea.

Los poliésteres utilizados en este estudio son fáciles de conseguir en estado puro y reciclado, sobre todo el PET grado botella debido a que en los últimos años se ha incentivado al reciclaje de este material e incluso, existen empresas dedicadas a esta actividad.

Finalmente al mezclar dos componentes, se suele hacerlo en proporciones extremas y si se trata de un contaminante, el cual se quiere identificar en una matriz, la cantidad es aún menor.

Por las razones antes explicadas, la mezcla que se seleccionó para validarla con materiales reciclados para posteriormente realizar el diseño de la planta piloto fue la correspondiente a 95 % PETb – 5 % PBT. El Poli (etilén tereftalato) proveniente de botellas recicladas fue suministrado por la empresa ENKADOR y Poli (butilén tereftalato) fue obtenido de bombillas ahorradoras usadas.

3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES RECICLADOS

3.3.2.1 Espectroscopía de infrarrojo

En la Figura 3.35 se muestran los espectros IR obtenidos del PETb comercial y reciclado.

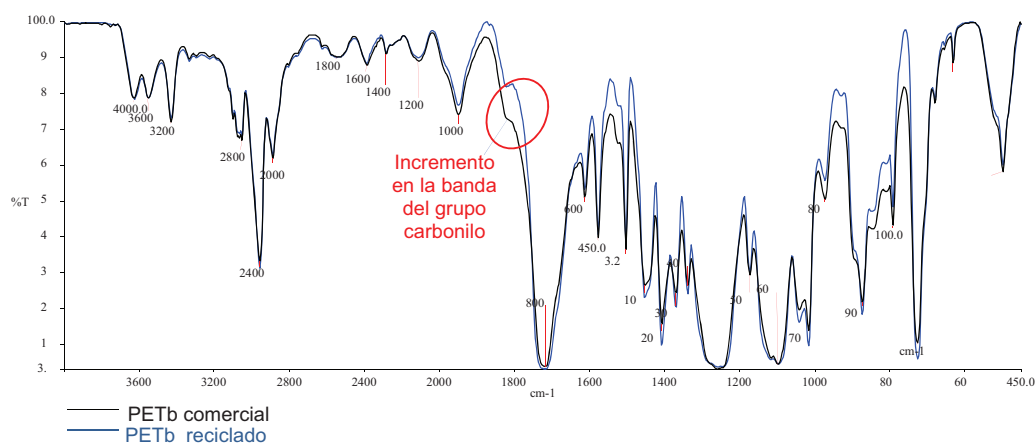


Figura 3.35. Espectros infrarrojos de PETb comercial y reciclado

En la Figura 3.36 se muestra el espectro IR del PBT comercial y reciclado.

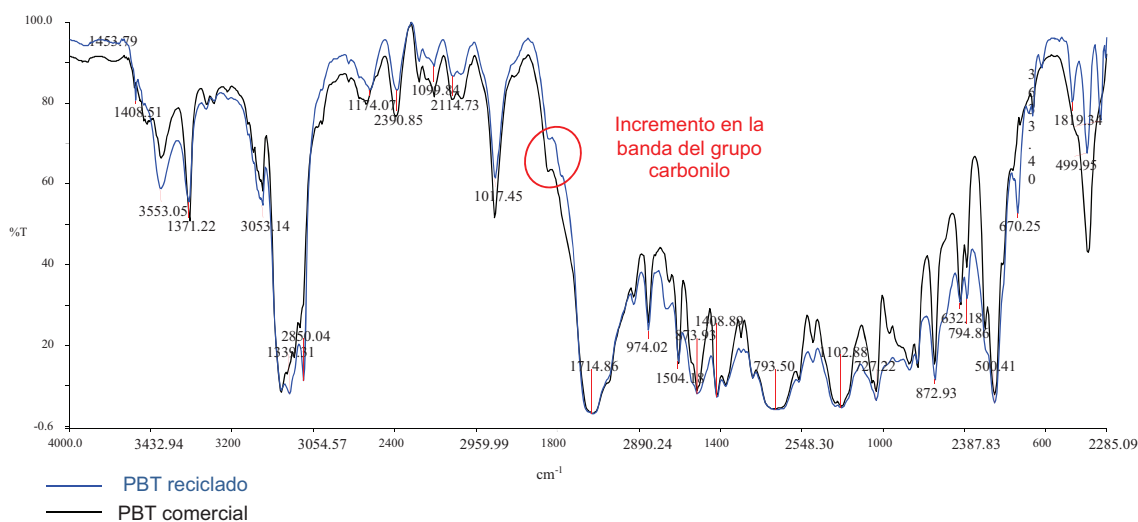


Figura 3.36. Espectro infrarrojo de PBT comercial y reciclado

La superposición entre las bandas de los espectros de los materiales reciclados con sus respectivos comerciales indicó que en efecto, fueron del mismo tipo. Las bandas características en 1265 , 1110 , 867 y 725 cm^{-1} indicaron que las muestras correspondieron a ésteres de ácido carboxílico tipo tereftalato. La única diferencia encontrada para ambos caso, fue un incremento en la banda del grupo carbonilo correspondiente a los 1725 cm^{-1} , lo cual indicó que los materiales reciclados podrían haber sufrido algún tipo de degradación.

3.3.2.2 Determinación de la densidad

En la Tabla 3.14 se muestran los valores de densidad obtenidos para cada material.

Los valores experimentales de densidad de los materiales reciclados variaron de sus correspondientes en estado puro. Esto se debió a que en el caso del PETbr, el material usado para el estudio provino de diferentes tipos de botellas, algunas de las cuales pudieron haber sufrido algún tipo de degradación y como

consecuencia disminución en su peso molecular. En el caso del PBTr, el material fue obtenido de boquillas de lámparas ahorradoras, que es una aplicación para la cual al plástico se le añaden diferentes tipos de aditivos. Además en el proceso de reciclaje, es frecuente que los materiales se contaminen con otras sustancias que podrían alterar su densidad. Los datos experimentales obtenidos para la determinación de la densidad se encuentran en el Anexo II.

Tabla 3.14. Valores de densidad obtenidos para los materiales puros y reciclados

	Material			
	PETb	PETbr	PBT	PBTr
Densidad experimental \pm desviación estándar (g/cm³)	1,38 \pm 0,02	1,27 \pm 0,02	1,38 \pm 0,02	1,46 \pm 0,01

$\bar{x} \pm \sigma$ (n = 3)

3.3.2.3 Determinación del contenido de cenizas

La Tabla 3.15 muestra el porcentaje de inorgánicos presentes en cada una de las muestras.

Tabla 3.15. Porcentaje de inorgánicos presentes en los materiales puros y reciclados

	Material			
	PETb	PETbr	PBT	PBTr
Porcentaje de inorgánicos (%)	0,06	1,96	15,34	33,41
Desviación estándar	0,01	0,01	0,01	0,10

$\bar{x} \pm \sigma$ (n = 3)

El contenido de inorgánicos presentes en los reciclados fue superior a la encontrada en los materiales puros. Este comportamiento podría explicarse por la procedencia y aplicaciones que tuvieron los materiales usados durante su vida útil. En el PBTr, y de igual forma como se explicó para el caso de la densidad, el material fue obtenido de boquillas de lámparas ahorradoras, que es una aplicación para la cual al plástico se le añaden diferentes tipos de aditivos.

Además, el aumento en el contenido de inorgánicos presentes podría ser consecuencia de contaminantes en el proceso de reciclaje. Los datos experimentales obtenidos para la determinación de la densidad se encuentran en el Anexo III.

3.3.2.4 Determinación de las transiciones térmicas de los materiales reciclados

a) Temperatura de cristalización

En la Figura 3.37 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos realizados correspondientes al primer enfriamiento para la determinación de la temperatura de cristalización del PETb y PETbr.

Al igual que en el caso del material puro, la forma de la curva de cristalización del PETb reciclado sugirió una distribución ancha en el tamaño de los cristales, que podría ser consecuencia del estado amorfo inicial del material y de la nucleación heterogénea, que originaría la formación de estructuras cristalinas finas y relativa transparencia, propiedad necesaria para este material.

Se observa también que el material reciclado tuvo una mayor temperatura de cristalización correspondiente a 177,8 °C en comparación con la del puro que fue de 163,2 °C. La diferencia podría deberse a la velocidad de enfriamiento utilizada para cada ensayo, en el primer caso el equipo no permitió controlar la tasa mientras que para el segundo, fue de 10 °C/min. La velocidad de enfriamiento del material reciclado podría haber ocasionado que las cadenas del polímero se ordenaran mejor y se obtenga mayor cristalización.

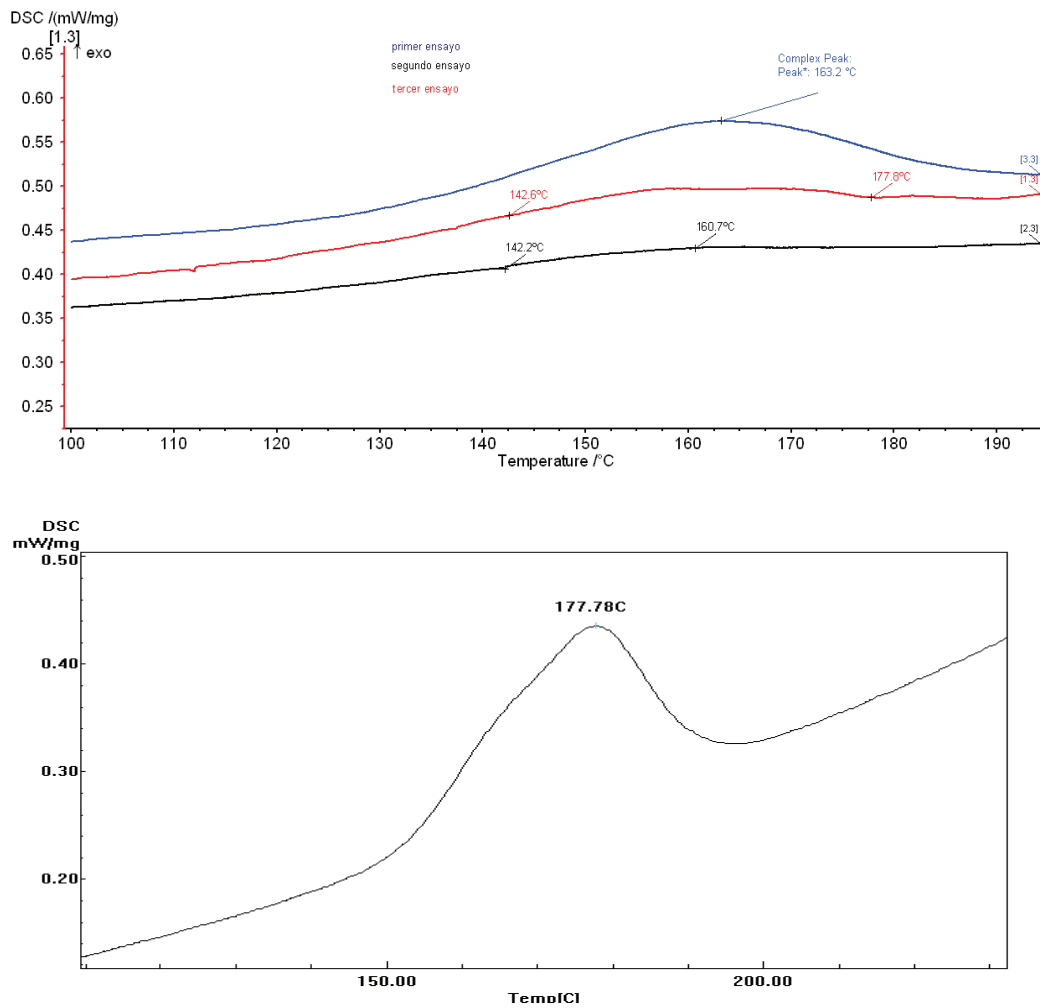


Figura 3.37. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PETb (gráfico superior) y PETbr (gráfico inferior)

En la Figura 3.38 se muestran los termogramas de los ensayos realizados correspondientes al primer enfriamiento para la determinación de la temperatura de cristalización del PBT y PBTr:

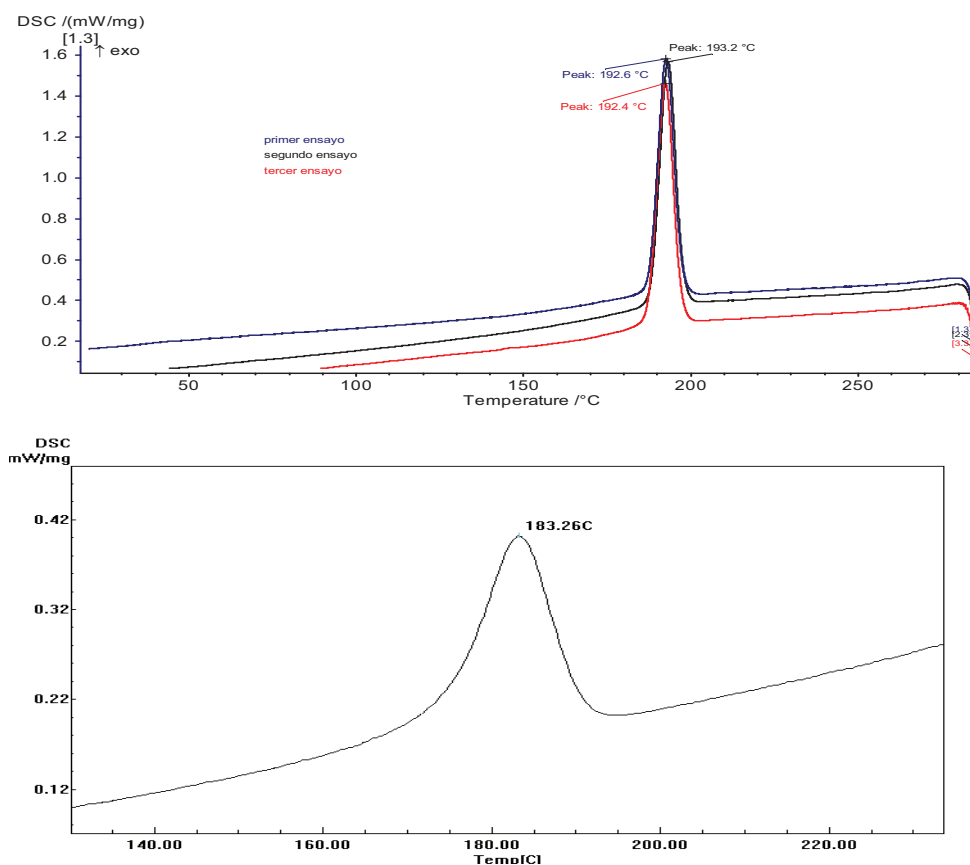


Figura 3.38. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de PBT (gráfico superior) y PBTr (gráfico inferior)

Como se aprecia en la Figura 3.38, existió un descenso en la temperatura del máximo de cristalización del material reciclado de alrededor de 10 °C, lo que al igual que en el caso anterior, podría ser producto de la tasa de enfriamiento usada y del contenido de inorgánicos presentes, cuyo valor fue del 33,41 %. Estos compuestos pudieron haber actuado como agentes nucleantes y al estar en mayor proporción que en el material comercial, favorecieron a la velocidad de cristalización y como consecuencia la disminución en el valor del máximo de temperatura. La forma de la curva indica una distribución más ancha en cuanto a las dimensiones de los cristales formados aunque al igual que en el material puro es simétrica. La forma de cristalización alfa (α) que es termodinámicamente estable y es observada cuando se lleva a cabo un enfriamiento lento podría haber sido la predominante (Calhoun y Peacock, 2006, p. 359).

b) Temperatura de transición vítrea

En la Figura 3.39 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al tercer calentamiento para la determinación de la temperatura de transición vítrea del PETb y PETbr:

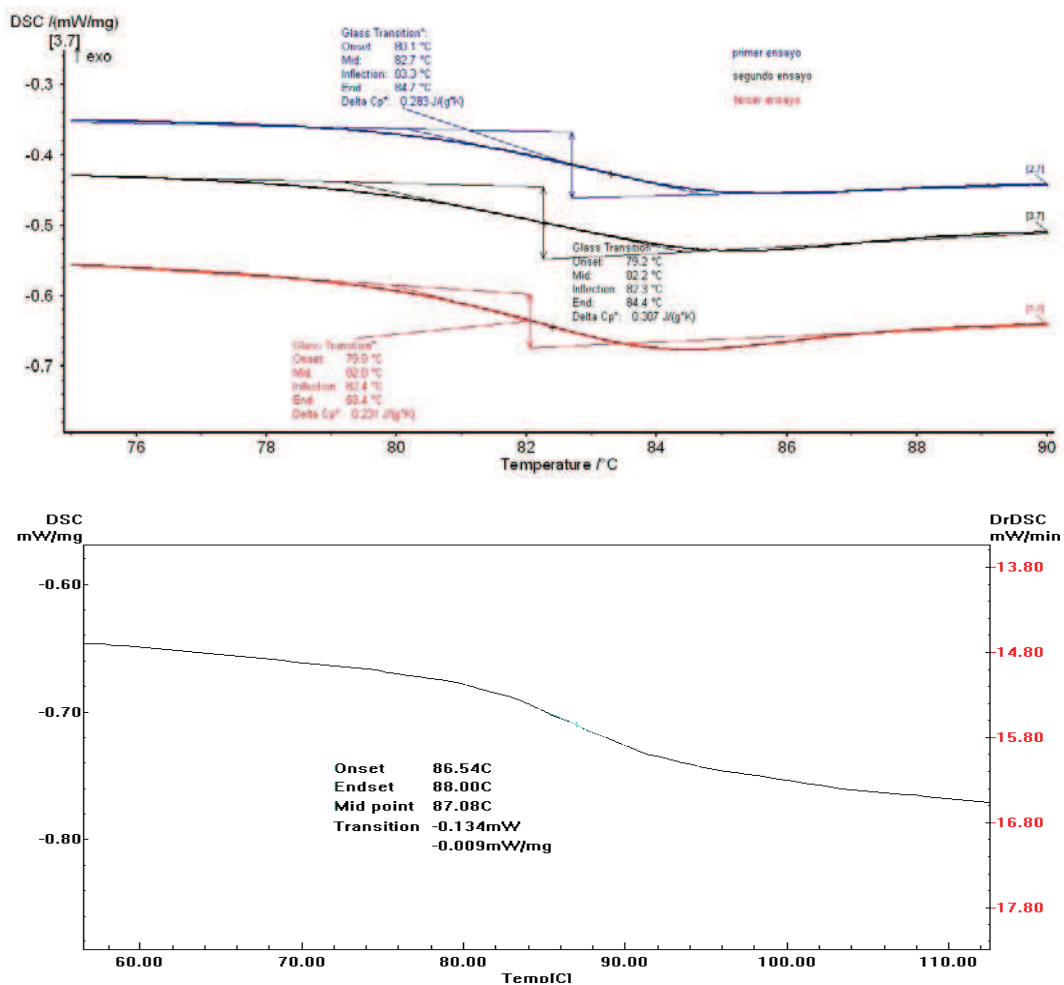


Figura 3.39. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PETb (gráfico superior) y PETbr (gráfico inferior)

En la Figura 3.40 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos correspondientes al tercer calentamiento para la determinación de la temperatura de transición vítrea del PBT y PBTr:

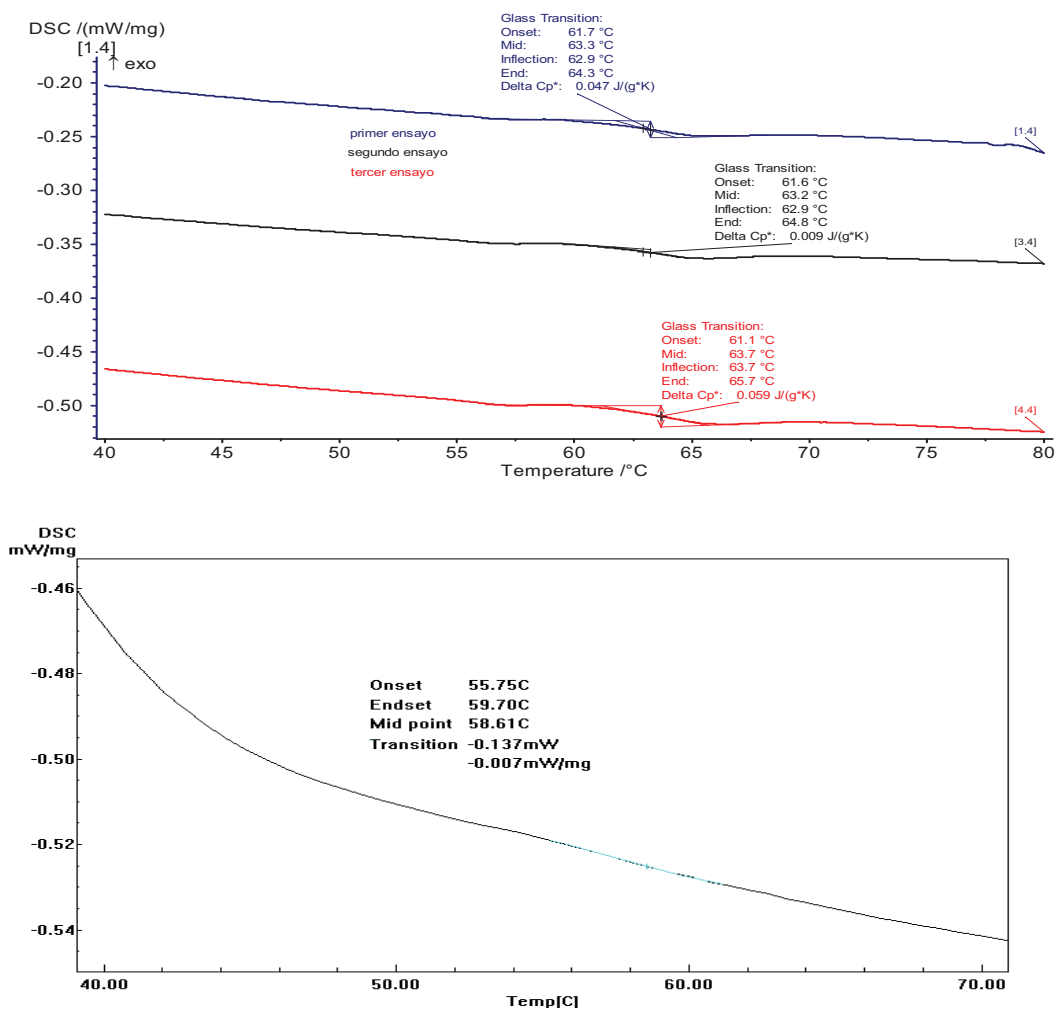


Figura 3.40. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de PBT (gráfico superior) y PBTr (gráfico inferior)

La temperatura de transición vítrea (T_g) obtenida para el PETbr fue de 87,08 °C, superior al valor promedio del PETb fue de $82,3 \pm 0,4$ °C, mientras que la T_g promedio del PBT fue de $63,4 \pm 0,3$ °C y del PBTr de 58,61 °C. Si bien el incremento en el contenido de inorgánicos presentes debería haber provocado una disminución en el volumen libre y por lo tanto un aumento en la T_g , se puede apreciar que la diferencia entre los valores de las temperaturas vítreas de los materiales comerciales y reciclados es de apenas ± 5 °C, lo cual indica que este factor, junto con la velocidad de enfriamiento no influenciaron de forma significativa en este parámetro.

c) Temperatura de fusión y calor de fusión

En la Figura 3.41 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos del segundo calentamiento para la determinación de la temperatura y calor de fusión del PETb y PETe:

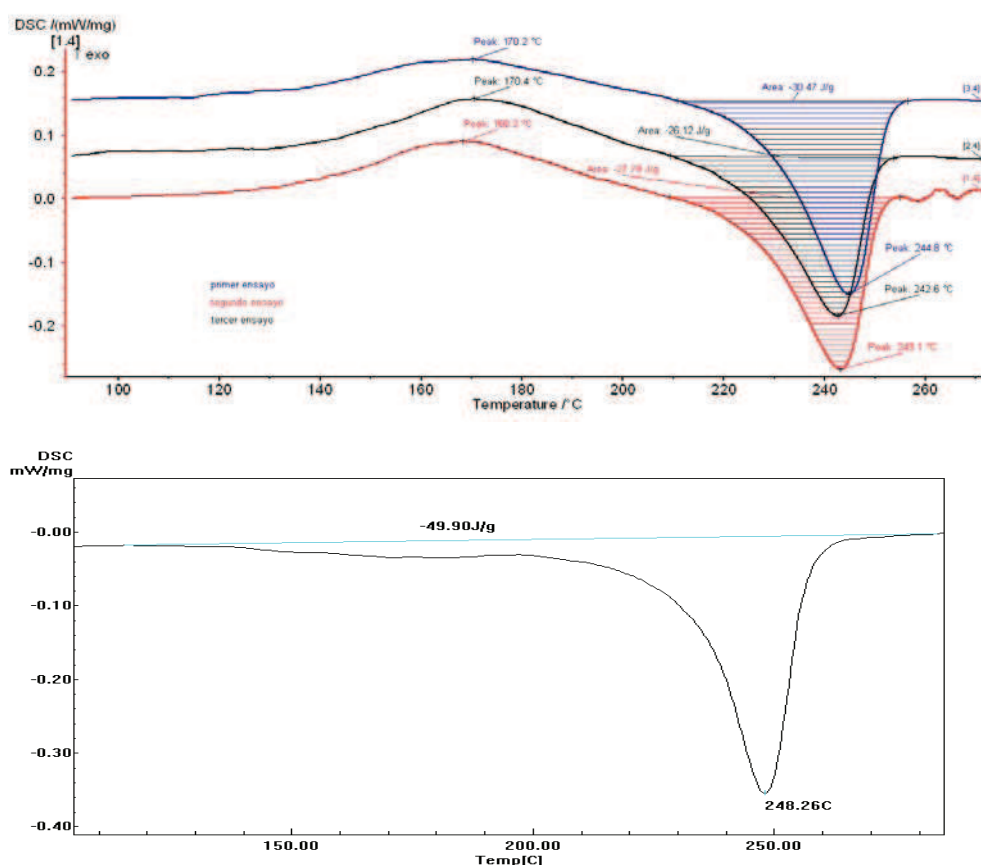


Figura 3.41. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PETb (gráfico superior) y PETbr (gráfico inferior)

A diferencia del PETb, en el material reciclado no se observó una cristalización en frío. La temperatura y calor de fusión fueron de 248,26 °C y -49,90 J/g. Se obtuvo un porcentaje de cristalinidad del 35,6 % en comparación con el 20,7 % del material puro, lo cual podría ser un indicador que las condiciones del enfriamiento previo favorecieron a la formación de una fase cristalina mayor.

En la Figura 3.42 se muestran los termogramas obtenidos de los ensayos del segundo calentamiento para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PBT y PBTr:

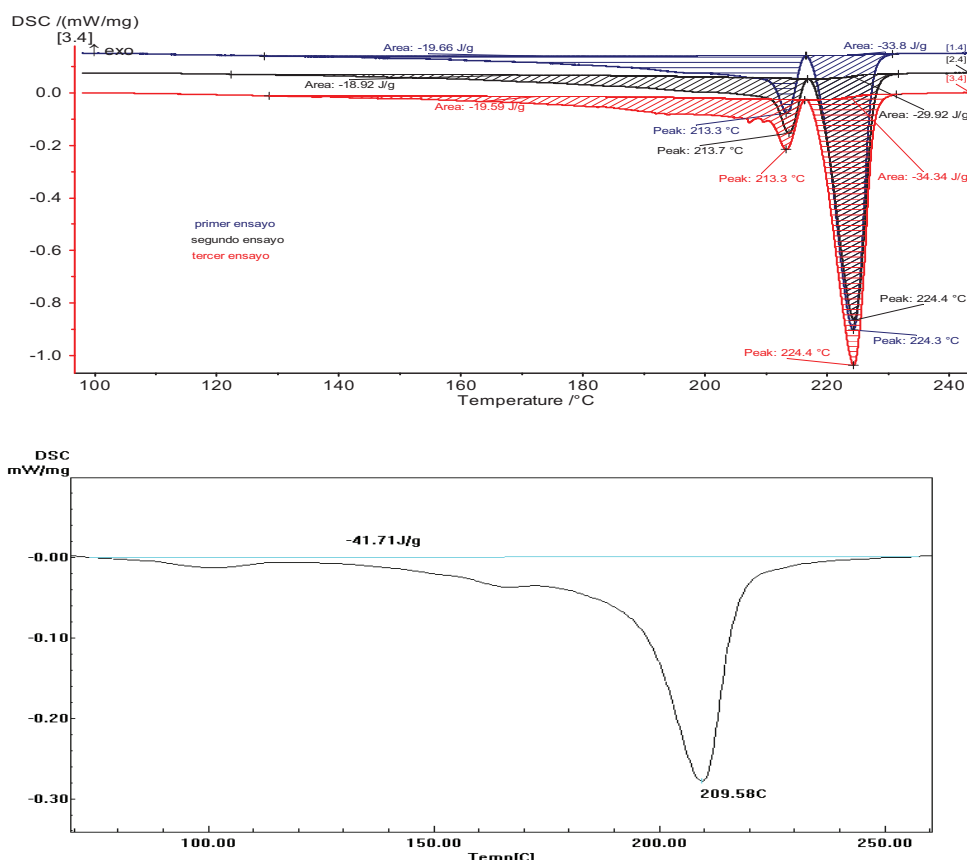


Figura 3.42. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión de PBT (gráfico superior) y PBTr (gráfico inferior)

El termograma correspondiente al PBTr indica la existencia de un pico de fusión a los 209,6 °C, el cual correspondería a la forma cristalina alfa (α) que es la más estable, cuyo valor en el material comercial fue de $224,4 \pm 0,1$ °C. Se observa también que existe un pequeño hombro alrededor de los 165 °C, que determinó la presencia de la forma cristalina beta (β). En cuanto a la cristalinidad, el material presentó un 29,8 % en comparación al 37,20 % en su estado puro. Estos descensos en los valores podrían deberse a la degradación del material, aditivos e impurezas, lo cual explicaría también la existencia de un pequeño pico alrededor de los 100 °C.

3.3.3 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA BINARIA CON MATERIALES RECICLADOS

En la Figura 3.43 se muestran los reogramas obtenidos de las mezclas del 95 % PETb - 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados

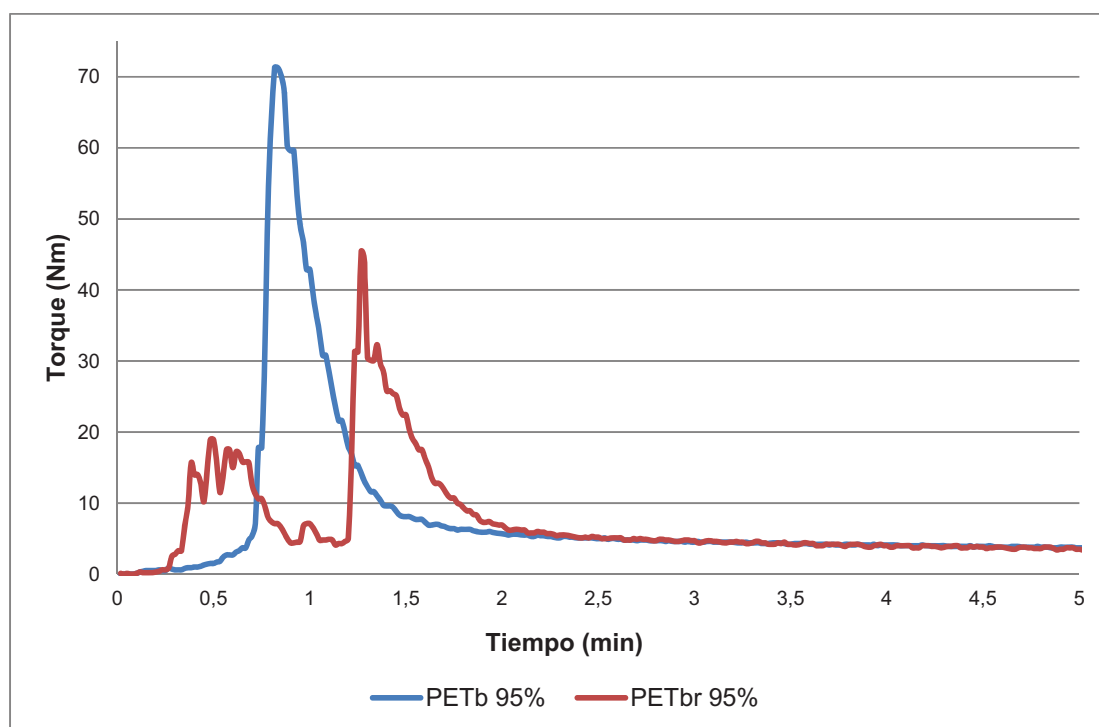


Figura 3.43. Reogramas obtenidos de las mezclas del 95 % PETb - 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados

La Figura 3.43 indica que las mezclas se estabilizaron al mismo valor de torque que fue aproximadamente 5 Nm. Se observa también que el tiempo en que la mezcla con materiales puros alcanzó la estabilidad fue a los 1,7 minutos aproximadamente, mientras que para la mezcla con reciclados fue de 2 minutos, con lo cual se puede notar que los tiempos no están muy alejados entre sí. La diferencia radicó en el punto de carga debido a que los materiales comerciales fueron suministrados en pellets, mientras que los reciclados en hojuelas, lo cual ocasionó cierto grado de dificultad para colocarlos dentro de la cámara. Estos materiales presentaron resistencia al descenso del pistón, motivo por el cual se observa dos supuestos picos de carga.

3.3.4 DETERMINACIÓN DE LAS TRANSICIONES TÉRMICAS DE LA MEZCLA CON MATERIALES RECICLADOS

a) Temperatura de cristalización

En la Figura 3.44 se muestran los termogramas obtenidos del primer enfriamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 95% PETb y 95 % PETbr. Como se puede observar, en la mezcla reciclada existió un máximo exotérmico a los 200,23 °C superior a la encontrada para los materiales reciclados individuales y a la de la mezcla comercial que fue de 173,5 °C. Esta variación podría haber sido originada por la velocidad de enfriamiento utilizada en el ensayo, la cual no tuvo una tasa constante porque la configuración del equipo no permitió regularla. Se aprecia también que a diferencia de la mezcla original, no existió ningún otro máximo ni hombro ya que los poliésteres reciclados no contenían ningún tipo de carga ni refuerzo cuyas partículas pudiesen dar lugar a una nucleación.

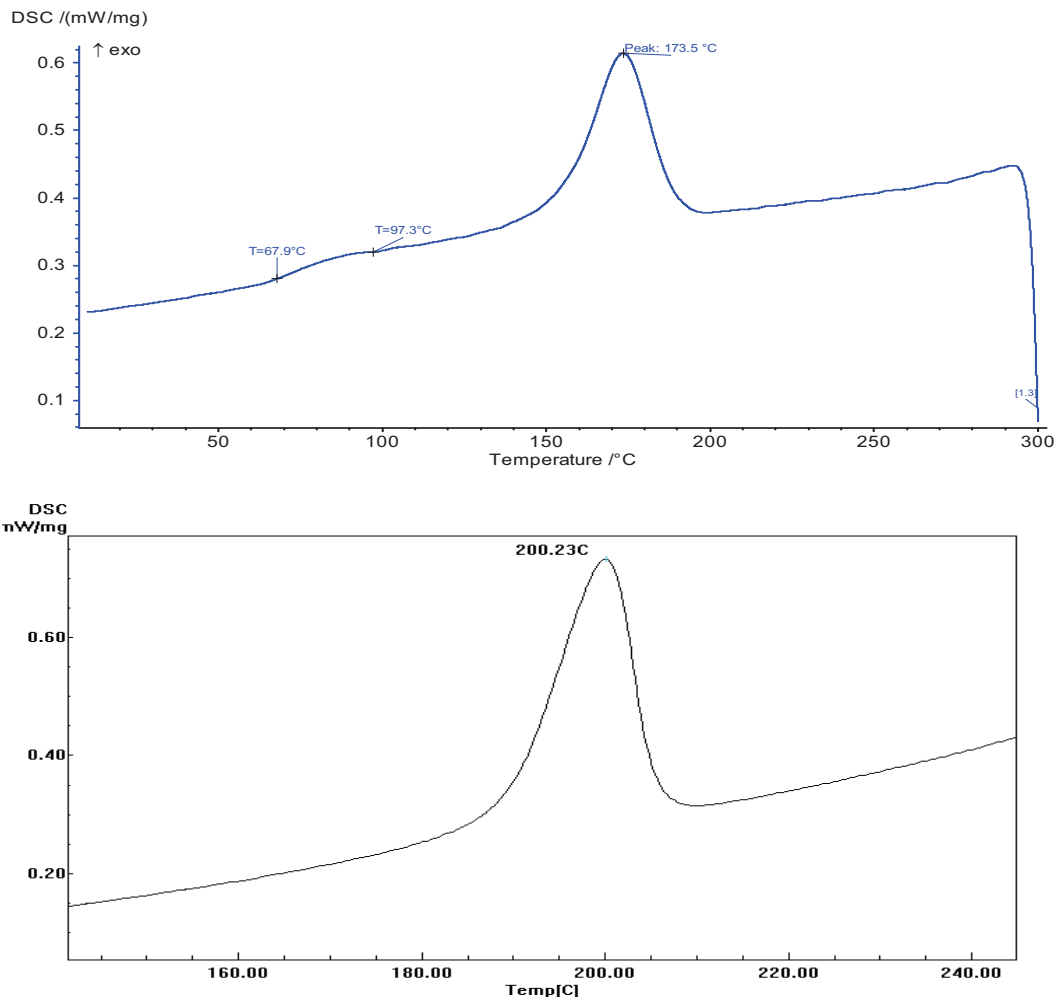


Figura 3.44. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de cristalización de las mezclas 95% PETb (superior) y 95 % PETbr (inferior)

b) Temperatura de transición vítrea

En la Figura 3.45 se muestran los termogramas obtenidos del tercer calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 95% PETb y 95 % PETbr:

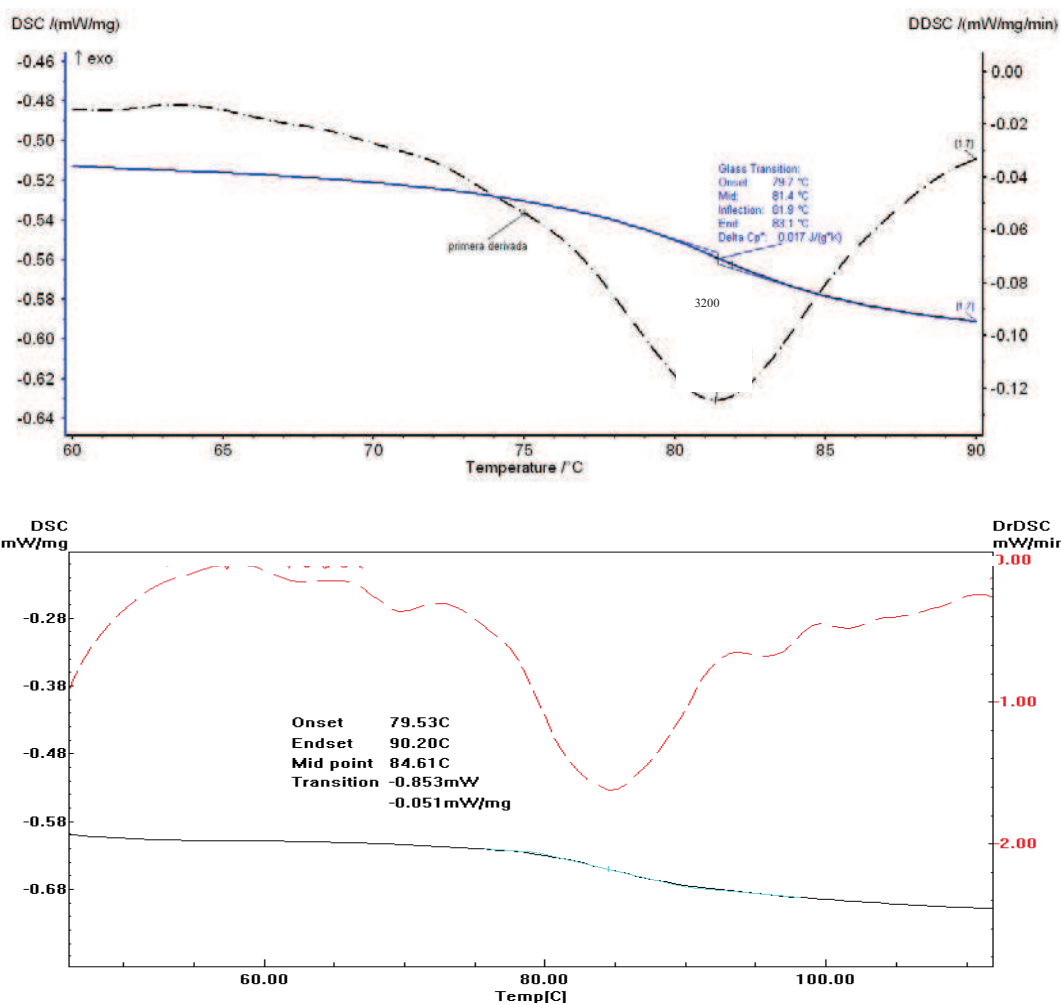


Figura 3.45. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura de transición vítrea de las mezclas 95% PETb (superior) y 95 % PETbr (inferior)

Los gráficos de la Figura 3.45 indican que la mezcla comercial y la reciclada mostraron una sola Tg tanto en la curva DSC como en la derivada, lo que significa que son completamente miscibles y que el reprocesamiento de los materiales no afectó esta característica. La Tg de la mezcla reciclada fue de 84,61 °C, valor que se encuentra entre los reportados para los materiales reciclados pero superior en 3 °C al de la mezcla original, variación que no fue muy significativa.

c) Temperatura y calor de fusión

En la Figura 3.46 se muestran los termogramas obtenidos del segundo calentamiento de los ensayos realizados para la determinación de la temperatura y calor de fusión de las mezclas 95% PETb y 95 % PETbr:

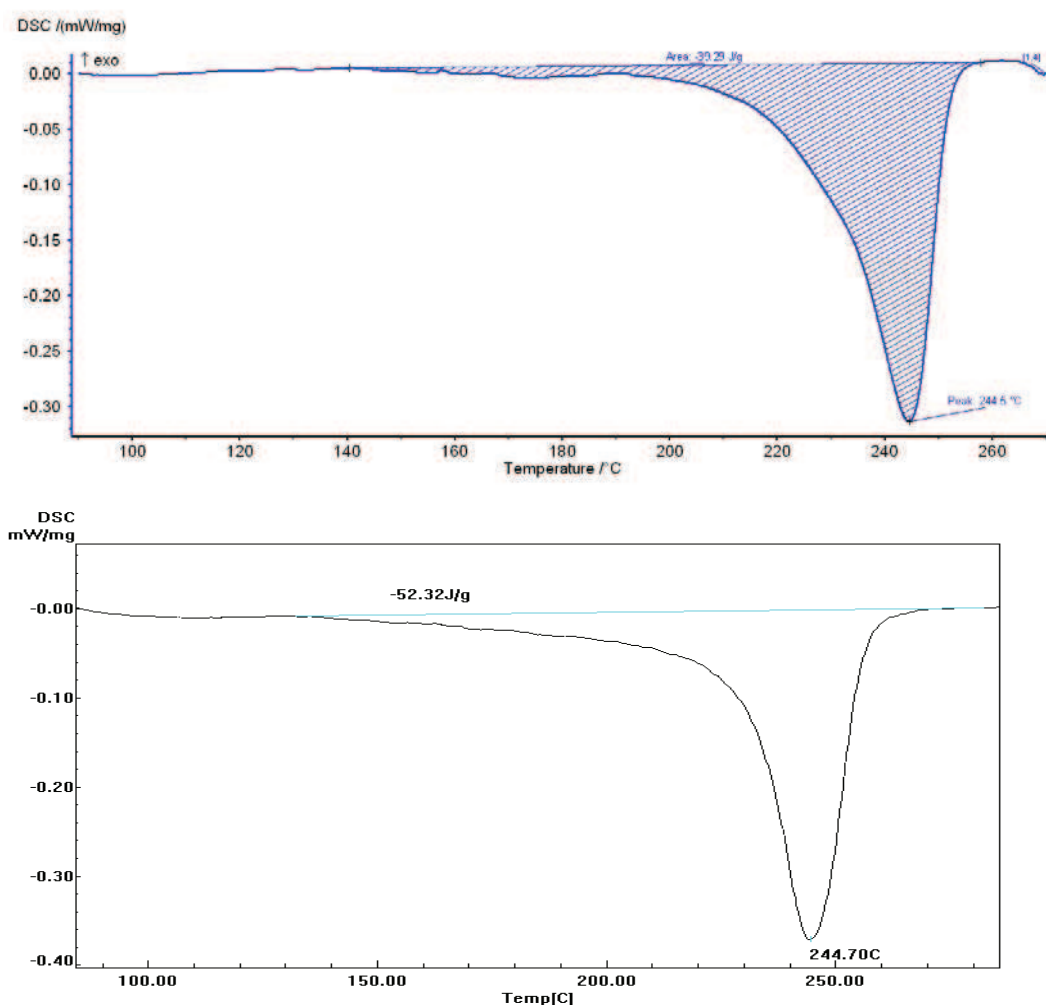


Figura 3.46. Termogramas obtenidos para la determinación de la temperatura y calor de fusión las mezclas 95% PETb (superior) y 95 % PETbr (inferior)

Como se puede observar en la Figura 3.46, existe un solo pico de fusión para las dos mezclas. El agregar 5 % PBTr a la matriz de PETbr, aumentó el calor de fusión de éste último de -49,9 J/g a -52,32 J/g, comportamiento que también fue observado para el caso de la mezcla con materiales comerciales. En el caso de la

temperatura de fusión, ésta no se vio afectada por el uso de materiales reciclados ya que solo varió de 244,5 °C a 244,7 °C.

3.3.5 EVALUACIÓN DEL MEZCLADO DISPERSIVO Y DISTRIBUTIVO

En la Figura 3.47 se muestran las probetas obtenidas de las mezclas 95 % PETb y 5 % PBTr:

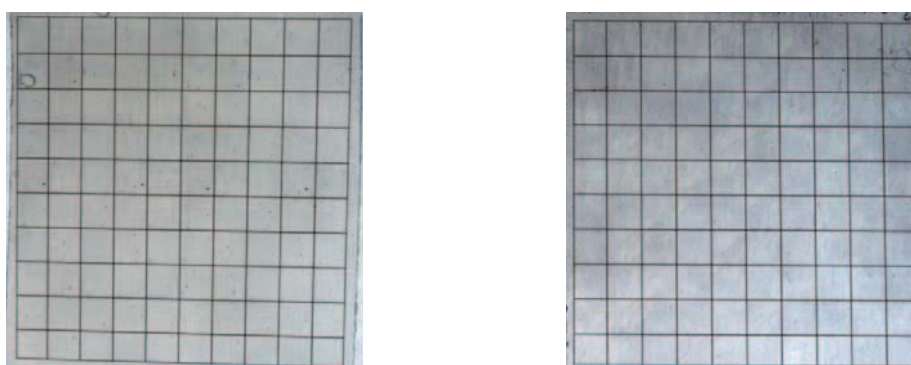


Figura 3.47. Probetas obtenidas de las mezclas 95 % PETb (izquierda) y 95 % PETbr (derecha)

La Figura 3.47 muestra que la probeta obtenida de los materiales reciclados no presentó una apariencia uniforme como en el caso de la probeta de materiales comerciales, lo cual se debió a la principalmente a la forma de obtención de las mismas. Para su elaboración, se tuvo que prensar pedazos de mezcla que no se pudieron distribuir uniformemente en el molde provocando diferencias en el espesor y como consecuencia variaciones en el color; sin embargo, esto no significó que los componentes mezclados no posean una buena dispersión y distribución como en el caso de la mezcla con materiales comerciales.

3.4 DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE MEZCLADO CON MATERIALES EN ESTUDIO RECICLADOS

3.4.1 INGENIERÍA CONCEPTUAL

3.4.1.1 Definición del producto

Se realizó el diseño preliminar de una planta piloto para la obtención de una mezcla 95 % PET – 5 % PBT de materiales comerciales y reciclados cuya presentación para su comercialización será en sacos de 25 kg. Inicialmente solo se consideró el procesamiento de materiales reciclados; sin embargo, posibles futuras expansiones de la planta y el hecho de que la línea de extrusión propuesta también puede procesar materiales vírgenes, motivaron a la ampliación del diseño.

3.4.1.2 Campo de aplicación

El producto a ser obtenido podrá ser utilizado en las siguientes aplicaciones:

- botellas de productos no alimenticios
- cuerdas
- cerdas para cepillos y escobas
- alfombras
- TNT (tela no tejida)
- Carcasas para dispositivos eléctricos, etc.

3.4.1.3 Disponibilidad de materia prima

Para la provisión del PET y PBT virgen, se tomará en cuenta la disponibilidad de las diferentes casas comerciales locales. En la ciudad existen algunas empresas

que se dedican a la comercialización de este tipo de materias primas, como por ejemplo NUTEC y PF Group; sin embargo, antes de la adquisición se llevará a cabo una comparación entre los precios, para de esta forma determinar la mejor oferta.

En cuanto a la materia prima reciclada, ENKADOR será la que abastezca a la planta con el PET reciclado, debido a que es una de las empresas que más se ha destacado en cuanto a la obtención de escama de PET y se encuentra en los alrededores de la ciudad de Quito. El PBT reciclado será obtenido desde el Centro de transferencia Norte ubicado en el Inga, debido a que allí se realiza un proceso de clasificación y separación de los desechos urbanos.

3.4.1.4 Capacidad y localización de la planta

- **Capacidad**

Para determinar la capacidad de producción de la planta, se consideraron las importaciones de PET en el año 2011, que fueron de aproximadamente 47 000 t, de esta cantidad, el 10 % que corresponde a 4 700 t son recicladas y podrían reutilizarse (EMASEO, 2010, p.2). Se estimó que una planta industrial procesaría el 20 % del material reciclado disponible, que equivaldría a 940 t y la planta piloto un 10 % de los mismos, lo que significó una producción de 260 kg/día.

- **Localización**

Como se observa en la Figura 3.48, la planta estará ubicada en el cantón Rumiñahui, en la Zona Industrial 2 via Sangolquí – Amaguaña. Se escogió este sector debido a su cercanía con ENKADOR, el proveedor principal de la materia prima a ser procesada. Se dispondrá de un terreno de 500 m² para la instalación de toda la infraestructura física.

El sector cuenta con red eléctrica, agua potable, servicio telefónico e internet, además al encontrarse en una zona Industrial del Valle de los Chillos, se tiene varias vías y carreteras para el fácil acceso tanto para proveedores de las materias primas e insumos como para los trabajadores que habitan en el sector.

La mano de obra será contratada de zonas aledañas, pues esta zona se encuentra cerca del sector de Sangolquí y poblados aledaños como Tambillo y Machachi.



Figura 3.48. Ubicación de la planta piloto
(Google, 2013)

3.4.2 INGENIERÍA BÁSICA

3.4.2.1 Diagramas BFD y PFD

En la Figura 3.49 y Figura 3.50 se muestran el diagrama de bloques (BFD) y el diagrama de flujo (PFD) del proceso de obtención de 260 kg/día de la mezcla 95 % PET – 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados.

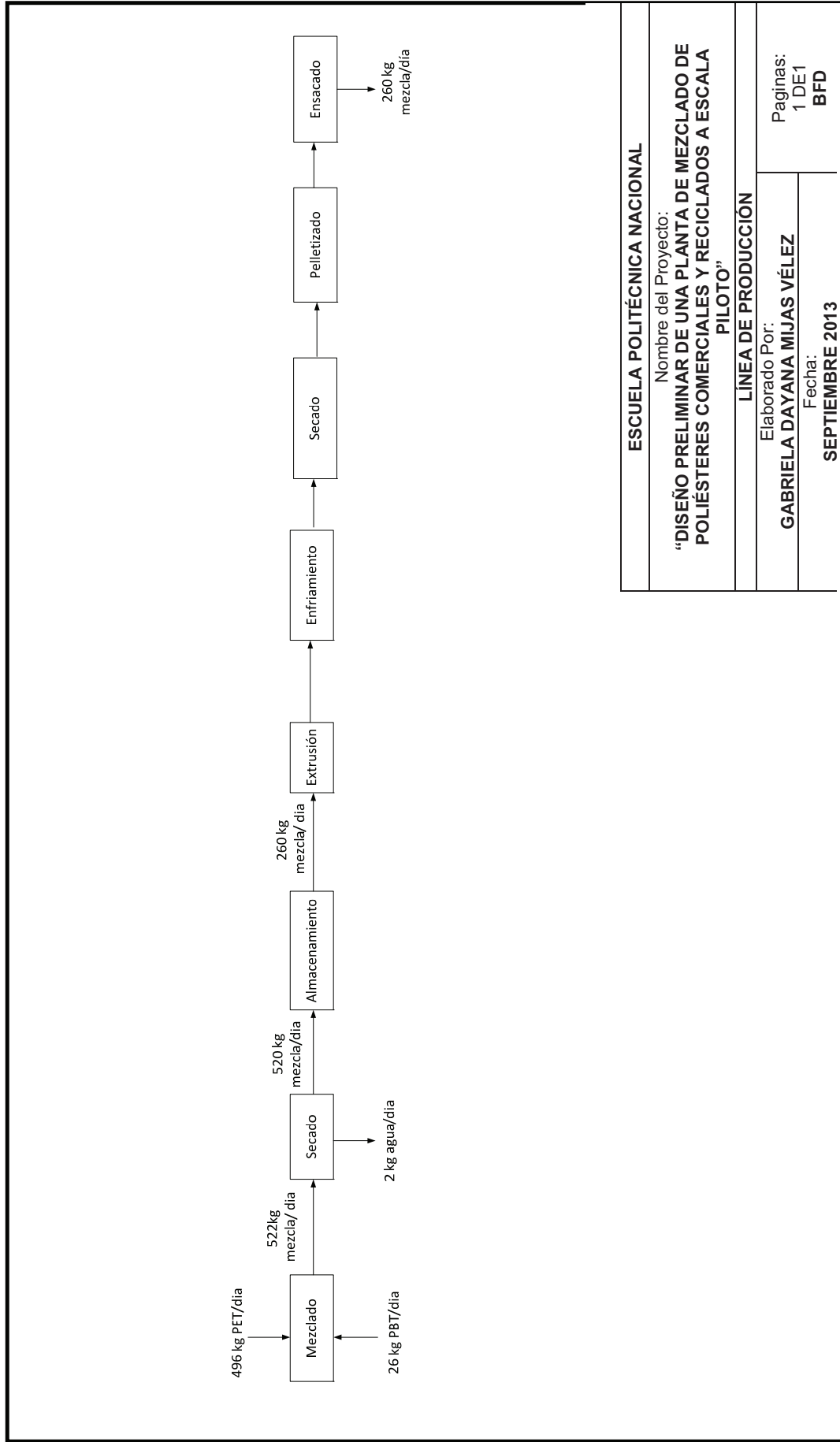


Figura 3.49. Diagrama de bloques del proceso (BFD) de obtención de 260 kg / día de la mezcla 95 % PET – 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados

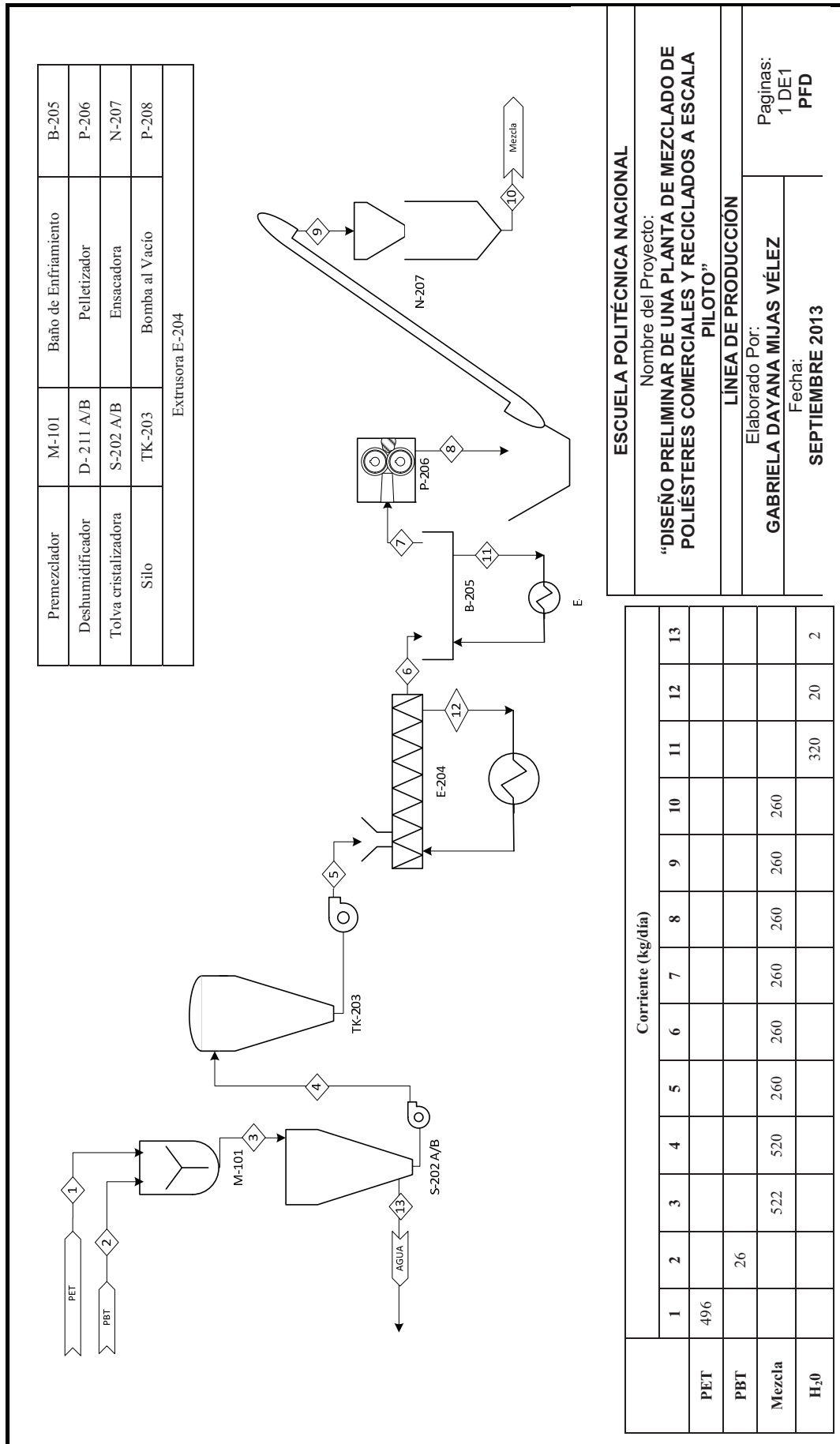


Figura 3.50. Diagrama de flujo del proceso (PFD) de obtención de 260 kg / día de la mezcla 95 % PET – 5 % PBT con materiales comerciales y reciclados

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 Nombre del Proyecto:
"DISEÑO PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE MEZCLADO DE POLIÉSTERES COMERCIALES Y RECICLADOS A ESCALA PILOTO"
LÍNEA DE PRODUCCIÓN
 Elaborado Por:
GABRIELA DAYANA MIJAS VÉLEZ
 Fecha:
SEPTIEMBRE 2013
 Paginas:
 1 DE 1
PFD

3.4.2.2 Equipos seleccionados para el proceso

En la Tabla 3.16 se muestran los equipos seleccionados para la planta con sus respectivas identificaciones. Se contará con un sistema de secado alterno para poder garantizar la continuidad en la producción. Las hojas de especificaciones de los equipos se encuentran en el Anexo X.

Tabla 3.16. Equipos seleccionados para la planta piloto

EQUIPO	CÓDIGO
Premezclador	M-101
Deshumidificador	D- 211 A/B
	D- 211 B/B
Tolva cristalizadora	S-202 A/B
	S-202 B/B
Silo	TK-203
Extrusora	E-204
Baño De Enfriamiento	B-205
Pelletizador	P-206
Ensacadora	N-207
Bomba al Vacío	P-208
Báscula Digital	Z-101
	Z-209

3.4.2.3 Plano de distribución en planta (Lay out) y plano de elevación

En la Figura 3.51 y en la Figura 3.52 se muestran el plano de distribución de la planta piloto y su plano de elevación. La instalación contará con una superficie alta en donde se ubicará el premezclador para que, por acción de la gravedad, el material caiga directamente a la tolva cristalizadora

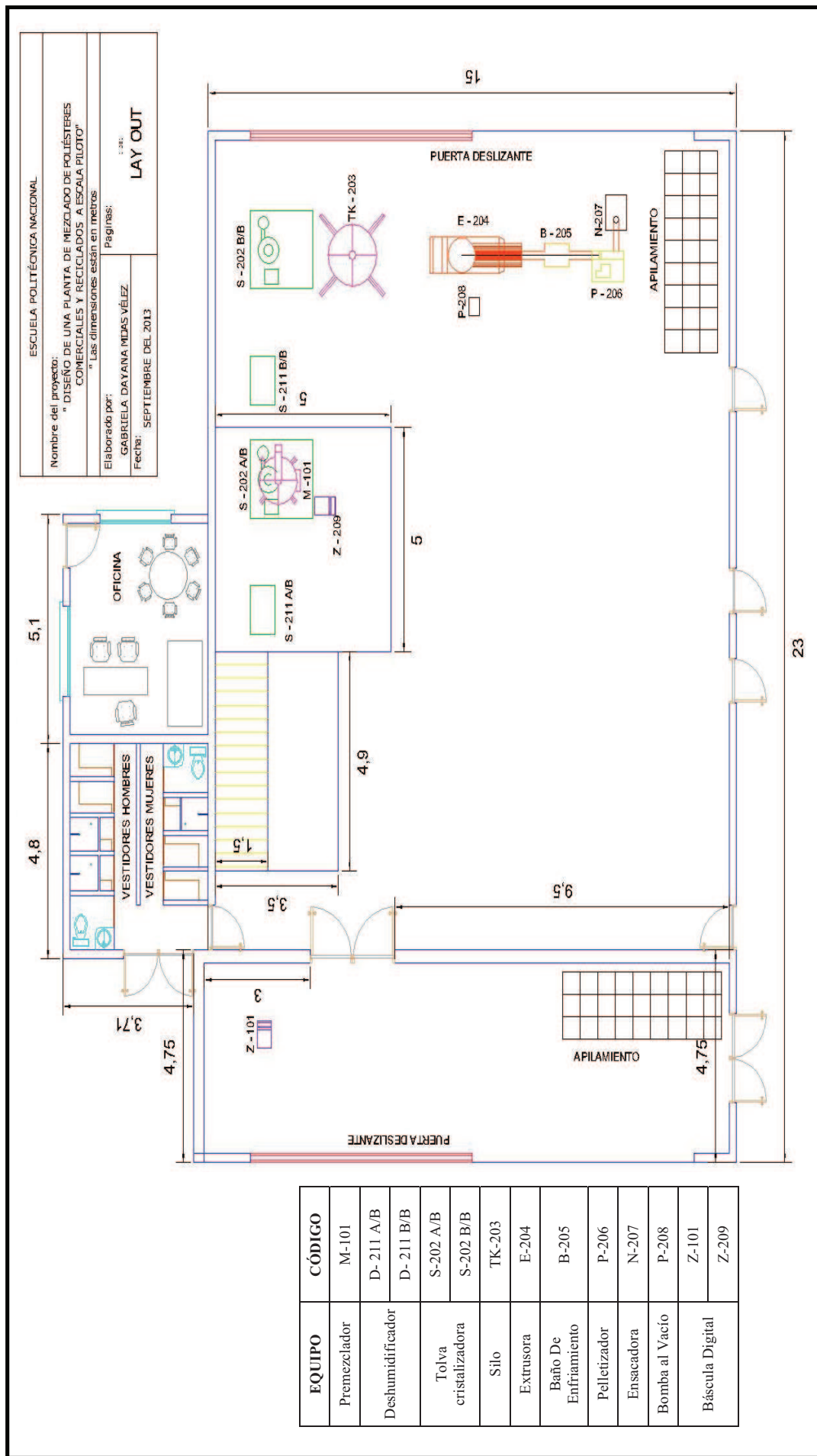


Figura 3.51. Plano de distribución (Lay out) de la planta piloto de mezclado de poliésteres comerciales y reciclados

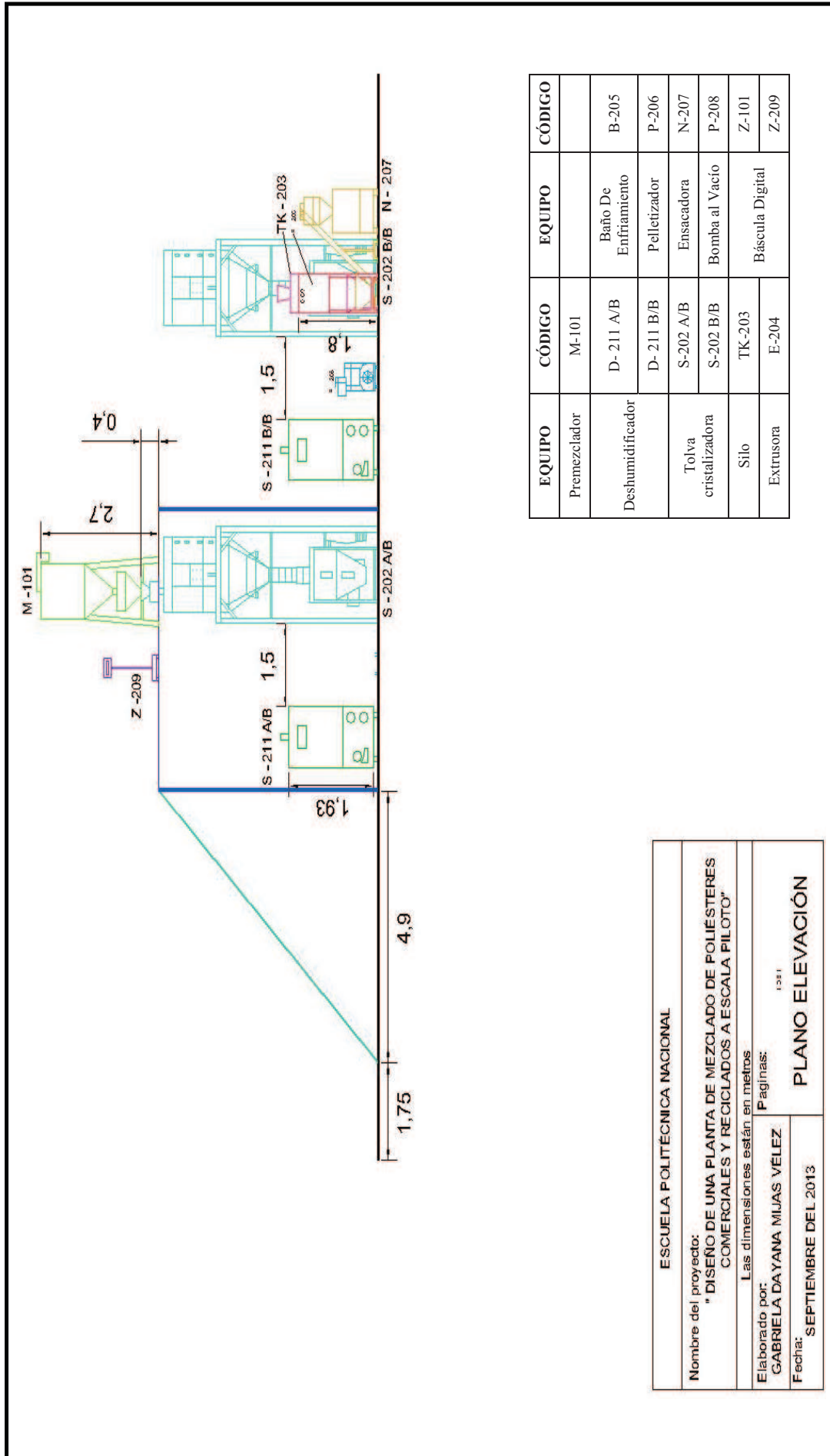


Figura 3.52. Plano de elevación de la planta piloto de mezclado de poliésteres comerciales y reciclados

3.4.2.4 Consumo energético de la planta piloto

En Tabla 3.17 se muestran los equipos a utilizarse en la planta con su respectivo consumo energético.

Tabla 3.17. Consumo energético de los equipos de la planta piloto diseñada

EQUIPO	POTENCIA DEMANDADA (kW)	HORAS DE FUNCIONAMIENTO AL DÍA (h/día)	ENERGÍA DEMANDADA (kWh/día)
Premezclador	7,5	2	15
Deshumidificador	23,5	2	47
Extrusora	27	8	216
Baño de enfriamiento	1	8	8
Pelletizador	2,2	8	17,6
Ensacadora	1,3	8	10,4
Bomba al Vacío	0,5	8	4
Báscula digital	0,05	2	0,1
Sistema de Alimentación	4,6	8	36,8
TOTAL	67,65		354,9

Para los cálculos se consideró un factor de corrección de 0,6 debido a que los equipos no trabajan al 100 % de su capacidad y no funcionan las 24 horas del día.

3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DE LA PLANTA PILOTO DISEÑADA

3.5.1 INVERSIÓN FIJA

En la Tabla 3.18 se muestran las inversiones fijas para la planta piloto diseñada. Los precios de los equipos se muestran en el Anexo XI.

Tabla 3.18. Inversiones fijas para la planta piloto diseñada

DENOMINACIÓN	VALOR
Terreno + Construcciones	50 000
Precio Equipos	575 849,4
Instalación de Maquinaria y Equipos	23 184
TOTAL	649 033,4

3.5.2 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE PRODUCCIÓN POR UNIDAD

En la Tabla 3.19 se muestra el salario de los trabajadores. La planta tendrá 2 obreros que laborarán 8 horas al día y percibirán el sueldo básico y todos los beneficios de ley.

Tabla 3.19. Salario de los trabajadores de la planta piloto

DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
Salario	318
Décimo tercer sueldo	318
Décimo cuarto sueldo	318
Aporte patronal 11,15%	35,5
Total anual	4 877,5
Total mensual	406,5
TOTAL MENSUAL PARA 2 OPERARIOS	813

En la Tabla 3.20 se muestran los costos por unidad de producción de la planta piloto. Los resultados indican que el costo por unidad de producción de la mezcla comercial es de \$ 70,36/saco y es aproximadamente el doble del costo de la mezcla reciclada, cuyo costo es de \$ 37,57/saco. La diferencia en los valores radica en el precio de las materias primas. Los cálculos realizados para la determinación del costo por unidad de producción se encuentran en el Anexo XII.

Tabla 3.20. Costos por unidad de producción de la planta piloto

DESCRIPCIÓN	\$/ SACO DE MEZCLA RECICLADA	\$/ SACO DE MEZCLA COMERCIAL
Materia prima	29,78	62,57
Salario	3,91	3,91
Agua	0,02	0,02
Energía eléctrica	3,61	3,61
sacos de PP	0,25	0,25
TOTAL	37,57	70,36

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Mediante las técnicas de espectroscopía de infrarrojo, determinación de densidad, contenido de cenizas y calorimetría diferencial de barrido (DSC), se logró caracterizar física y térmicamente a los materiales puros que fueron utilizados en el presente estudio, los cuales fueron seleccionados sobre la base de sus aplicaciones y disponibilidad local. Se usaron dos PET (grado inyección y extrusión), un PBT y una poliamida 6.
2. Se prepararon dos sistemas de mezclas: PET grado inyección/PBT (PETb/PBT) y PET grado extrusión/poliamida 6 (PETe/PA6).
3. El sistema PETb/PBT mostró miscibilidad total en las mezclas cuya concentración del primer componente fue mayor o igual al 80 %. Para concentraciones menores, la presencia de dos transiciones vítreas evidenció la existencia de una porción de PBT que no formó una sola fase amorfa con el otro componente.
4. La temperatura de transición vítrea de las mezclas miscibles del sistema PETb/PBT presentó una tendencia lineal en función de la concentración de los componentes en la mezcla, la misma que pudo ser descrita mediante la ecuación $T_g (^{\circ}\text{C}) = 0,5279(x\text{PETb})+30,043$, con una correlación $R^2=0,9913$.
5. Las temperaturas de transición vítrea de las mezclas miscibles del sistema PETb/PBT, al ser comparadas con las teóricas obtenidas con la ecuación de Fox, presentaron un error que aumentó en función de la cantidad de PBT en la mezcla y cuyo valor máximo fue del 8,7 %
6. En las mezclas miscibles del sistema PETb/PBT la fase dispersa aumentó el calor de fusión del componente mayoritario y su cristalinidad. Este efecto no se

observó en las mezclas que no fueron totalmente miscibles, en las cuales el PBT, sustancia en mayor proporción, disminuyó su calor de fusión.

7. La presencia de dos transiciones vítreas evidenció la inmiscibilidad del sistema PA6/PETe en todo el rango de composiciones.
8. La homogeneidad de las probetas observadas correspondientes a las mezclas de los dos sistemas estudiados permitieron apreciar que hubo un buen mezclado dispersivo y distributivo a nivel macroscópico.
9. Sobre la base de los resultados obtenidos del análisis de las propiedades térmicas, se seleccionó a la mezcla 95 % PETb – 5 % PBT para ser probada con materiales reciclados y posteriormente realizar el diseño de la planta piloto.
10. Las propiedades térmicas y la dispersión - distribución macroscópica de la mezcla elaborada con materiales reciclados no sufrieron variaciones considerables en comparación con las encontradas en la mezcla original.
11. Se realizó el diseño preliminar de una planta piloto para el procesamiento de 260 kg/día de mezcla 95 % PET – 5 % PBT de materiales comerciales y reciclados, el mismo que incluyó los diagramas de bloques, flujo, lay out de la planta y su plano de elevación para un área 500 m² de terreno.
12. La diferencia en los precios de los materiales vírgenes y reciclados determinó la diferencia entre el costo por unidad de producción de la mezcla comercial, el cual fue de \$70,36/saco, aproximadamente el doble del costo de la mezcla reciclada, cuyo costo fue de \$ 37,57/saco. Se estableció 25 kg de mezcla como unidad de producción.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Utilizar, siempre que el equipo lo permita, la misma velocidad de calentamiento y enfriamiento en los ensayos DSC.
2. Emplear la microscopía electrónica de barrido como herramienta para relacionar la dispersión y distribución de las fases encontradas a nivel macroscópico con las que se observarían a nivel microscópico.
3. Realizar ensayos de tracción con probetas de las mezclas obtenidas para determinar sus propiedades mecánicas.
4. Exponer placas obtenidas a partir de las mezclas a atmósferas de envejecimiento acelerado, para conocer las variaciones en sus características y propiedades.
5. Realizar un análisis económico del proyecto mediante la utilización de indicadores económicos para determinar el costo-beneficio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Akkapeddi, M. (2002). Comercial Polymer Blends. En Utracki L. (Ed). *Polymer Blends Handbook*. (pp. 1023-1115). Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers.
2. Andrews, R., y Grulke, E. (1999). Glass Transition Temperatures of Polymers. En Brandrup J., Grulke E. y Immergut E. (Ed). *Polymer Handbook*. (pp. 193-277). Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
3. Androsch, R., y Radusch, H. (2002). Blends Based on Poly(ButyleneTerephthalate). En Fakirov S. (Ed). *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*. (pp. 895-926). Verlag, Alemania: Wiley-VCH.
4. Arvanitoyannis, I., Biliaderisa, C., & Swanb, R. (1999). Physicochemical properties of commercial starch hydrolyzates in the frozen state. *Food Chemistry*, 64(4).
5. Aseplas. (2011). Importación de las principales materias primas. *Integra*, 1(27), 34.
6. ASTM. (2006). *Standard Test Method for Ash Content in Plastics (ASTM D5630-06)*. West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM.
7. ASTM. (2008). *Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry (ASTM D3418-08)*. West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM.

8. ASTM. (2008). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement (ASTM D792-08)*. West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM.
9. Augstkalns, V. (1995). Polyamidation. En M. Kohan, *Nylon Plastics Handbook*. Munich, Alemania: Hanser.
10. Automatismo Industrial. (2006). *Información Técnica PET*. Recuperado de <http://www.st-1.com.ar/st.php> (Octubre, 2011)
11. Avramova, N. (1995). Amorphous poly(ethylene terephthalate)/poly(butylene terephthalate) blends: miscibility and properties. *Polymer*, 36(4), 801-808.
12. Awaja, F., Cser, F., Daver, F. y Kosior, E. (2004). The effect of chain extension on the thermal behaviour and crystallinity of reactive extruded recycled PET. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 78(2004), 865–884.
13. Awaja, F. y Pavel, D. (2005). Review Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(1), 1453-1477.
14. Banco Central del Ecuador. (2012). *Comercio Exterior*. Recuperado de Importaciones:http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/ComercioExterior.jsp. (Enero,2012).
15. Beltrán, M. y Marcilla, A. (2011). *Tecnología de Polímeros*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf> (Octubre, 2012).
16. Bertilsson, H., Boldizar, A., Liu, X. y Rigdahl, M. (2002). Recycling of Blends of Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS) and Polyamide. *Journal of Applied Polymer Science*, 86, 2535–2543.

17. Billmeyer, F. (2004). *Ciencia de los Polímeros*. Barcelona, España: Reverté S.A.
18. Binsack, R. (1996). Thermoplastic Polyesters. En Bottenbruch L. (Ed). *Engineering Thermoplastics: Polycarbonates, Polyacetals, Polyesters, Cellulose Esters*.(pp. 6-11). Munich, Alemania: Hanser.
19. Bottenbruch, L. (1996). Introduction. En Bottenbruch L. (Ed). *Engineering Thermoplastics: Polycarbonates, Polyacetals, Polyesters and Cellulose Esters*. (pp. 1-5). Munich, Alemania: Hanser.
20. Boydell, P., Watson, S. y Williams, J. (1995). Properties. En M. Kohan, *Nylon Plastics Handbook*. (pp. 291-360). Munich, Alemania: Hanser.
21. Brandalise , R., Mauler , R. y Zeni, M. (s.f.). *Blends Of High Density Polyethylene and Poly(ethylene terephthalate)*. Recuperado de http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Articles/articlesFile_16605.pdf. (Octubre, 2012).
22. Brostow , W., Chiu , R., Kalogeras , I. y Vassilikou-Dova b, A. (2008). Prediction of glass transition temperatures: Binary blends and copolymers. *Materials Letters*, 1(62), 3152–3155.
23. Burnley, S., Chilton, T. y Nesaratnam, S. (2010). A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(2010), 1241–1249.
24. Cadena, F. y Quiroz, F. (2000). *Manual de Reciclaje de Plásticos*. Quito, Ecuador: Corporación Oikos.
25. Calhoun, A. y Peacock, A. (2006). *Polymer Chemistry*. Munich, Alemania: Hanser.

26. Clark, E. y Xenopoulos, A. (1995). Physical Structure. En Kohan M. (Ed). *Nylon Plastics Handbook*. (107-138). Munich, Alemania: Hanser.
27. Conalep. (2008). *Operación de Máquinas de Soplado*. Recuperado de http://www.conalepveracruz.edu.mx/descarga/f_tecnica/Profesional%20T%C3%A9cnico_COPEEMS/04.%2047%20CARRERAS/02%20FORMACI%C3%93N%20PROFESIONAL/PLAS08/Formacion%20Profesional%20B%C3%A1sica/5o%20Semestre/02%20Operacion%20control%20maquinas%20soplado.pdf (Noviembre, 2012)
28. Crouch, S., Holler, F., Skoog, D. y West, D. (2005). *Fundamentos de Química Analítica* (8va. ed.). México D. F., México: Thomson.
29. Curto, D., La Mantia, F. y Scaffaro, R. (2002). Recycling of Dry and Wet Polyamide 6. *Journal of Applied Polymer Science*, 86, 1899–1903.
30. Dangseeyun, N., Nithitanakul, M., Suphanol, P. y Thanomkiat, P. (2004). Thermal, Crystallization, Mechanical, and Rheological Characteristics of Poly(trimethyleneterephthalate)/Poly(ethylene terephthalate) Blends. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 42(1), 676-686.
31. De Abajo, J. y Guzman, J. (2000). Poliésteres Lineales. En ICYT (Ed.). *Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos, Selección de artículos publicados en Revista de Plásticos Modernos* (Vol. II). Madrid, España: P.G.M.
32. Dhar, V. y Varma, D. (1997). Studies of Nylon 6 / PET Polymer Blends: Structure and Some Physical Properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 33, 1103-1124.
33. Ding, Y., Gao, X., Meng, X., Qian, Z., Wang, F., Wen, B. y Zhang, S. (2008). Inhibited transesterification of PET/PBT blends filled with silica nanoparticles. *Polymer Degradation and Stability*, 1(93), 1397–1404.

34. Ehrenstein, G., Riedel, G. y Trawiel, P. (2004). *Thermal Analysis of Plastics*. Munich, Alemania: Hanser.
35. Ellis, T. (1995). Blending. En Kohan, M. (Ed.). *Nylon Plastics Handbook*. (pp. 268-283). Munich, Alemania: Hanser.
36. EMASEO. (2010). *Plan de Servicios de Aseo*. Recuperado de <http://www.emaseo.gov.ec/documentos/planes/plandeaseocalderon.pdf> f. (Febrero, 2012).
37. Empresa Eléctrica Quito. (2013). *Pliego Tarifario Vigente, Período de Consumo: 1 Al 30 de Abril de 2013*. Recuperado de <http://www.eeq.com.ec/upload/pliegos/20130325014610.pdf>. (Abril, 2013).
38. Everaert, V., Groeninckx, G. y Vanneste, M. (2002). *Cristallization, morphological structure, and melting of polymer blends*. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers.
39. Fakirov, S. (2002). *Oriented Polymer Materials*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
40. Galanty, P. y Rao, M. (1995). PA-6. En Kohan M. (Ed.). *Nylon Plastics Handbook*. (pp. 518-548). Munich, Alemania: Hanser.
41. Geil, H. y Rybnikar, F. (1991). Interactions at the PA-6/PA-66 Interface. *ACRC Project #16: Nylon Refrigerant Tubing*, 1(4), 1-16.
42. Geil, P. (2002). Crystal Structure, Morphology and Orientation of Polyesters. En Fakirov S. (Ed.). *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites* (pp. 105-224). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.

43. Giles, H., Mount III, E. y Wagner, J. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. Nueva York, Estados Unidos: William Andrew Inc.
44. Giménez, E. y Osswald, T. (2008). *Procesado de Polímeros*. Cúcuta, Colombia: Gaudales.
45. Google. (2013). *Google Maps*. Recuperado de <http://maps.google.es/> (Abril, 2013).
46. Gruenwald, G. (1993). *Plastics*. Munich, Alemania: Hanser.
47. Haines, P., Reading, M. y Wilburn, F. (1998). Differential Thermal Analysis and Differential Scanning Calorimetry. En Brown, M. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry* Vol. 1. (pp. 279-362). Amsterdam, Holanda: Elsevier.
48. Hatakeyama, T. y Quinn, F. (1999). *Thermal Analysis, Fundamentals and Applications to Polymer Science* (2da. ed.). Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons.
49. Hensen, F. (1997). *Plastic Extrusion Technology* (2da. ed.). Munich, Alemania: Hanser.
50. Herman, M. (2004). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3ra. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Wiley Interscience.
51. Hirao, M., & Nakatani, J. (2011). Multicriteria Design of Plastic Recycling Based on Quality Information and Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 15(2), 228-242.
52. Instituto Americano del Petróleo. (1998). *Los tanques de acero soldados para almacenamiento del petróleo, Apéndice A: Bases de diseño opcional*

para tanques pequeños. Washington, Estados Unidos: API.

53. IUPAC. (2004). *Definitions of Terms Related to Polymer Blends, Composites and Multiphase Polymeric Materials*. Recuperado de <http://pac.iupac.org/publications/pac/pdf/2004/pdf/7611x1985.pdf>. (Abril 2012)
54. IUPAC. (2013). *Abbreviations of Polymer Names and Guidelines for Abbreviating Polymer Names, Appendix: Extended List of Currently Used Abbreviations for Polymer Names*. Recuperado de http://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/publications/recommendations/2013/he_prs.pdf. (Junio, 2013)
55. Ju, K. y Yu, Y. (1997). Crystallization in Blends of Poly(ethylene Terephthalate) and Poly(Butylene Terephthalate). *Polymer Engineering and Science*, 37(1), 91-95.
56. Kaisersberger, E. y Mohler, H. (2010). *DSC on polymeric Materials, Netzsch Annual for Science and Industry (Vol. I)*. Berlín, Alemania: Netzsch.
57. Karger-Kocsis, J. (2002). Recycling Options for Post-Consumer PET and PET-Containing Wastes by Melt Blending. En Fakirov S., *Handbook of Thermoplastic Polymers: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*. (pp. 1291-1320). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
58. Katime, I. y Rego, M. (1990). Study of PMMA / PNVK Blends by DTA. *Termochimica*, 1(90), 215-219.
59. Kenplas Industry Limited. (2012). *Dehumidifier*. Recuperado de <http://www.kenplas.com/dehumidifier/> (Junio, 2013).
60. Li, Y. y Yang, G. (2004). Studies on Molecular Composites of Polyamide 6/Polyamide 66. *Macromolecular Rapid Communications*, 25(1), 1714–

1718. doi: 10.1002/marc.200400262.

61. Lokensgard, E. y Richardson, T. (2000). *Industria del Plástico*. Madrid, España: Paraninfo.
62. Luengo, G. (1993). *Mezclas de Polímeros. Estudio de su Compatibilidad*
Recuperado de eprints.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0016701.pdf
(Diciembre, 2011).
63. Lukaszyk, W. (2000). Material Handling. En Harper C. (Ed.). *Modern Plastics Handbook*. (7.3-7.62). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
64. Mano, J. (2003). Propiedades Térmicas de los Polímeros en la Enseñanza de la Ciencia de Materiales e Ingeniería- Estudios DSC sobre Poli(tereftalato de etileno). *Journal of Materials Education*, 25(4-6), 155-170.
65. Marechal, E. (2002). Polyesters: Synthesis and Chemical Aspects. En Fakirov, S. (Ed). *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*. (3-58). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
66. Matweb. (2011). *Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced*. Recuperado de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20&ckck=1>. (Noviembre, 2012).
67. McKenna, G. y Simon, S. (2002). The glass transition: its measurement and underlying physics. En Cheng, S. (Ed.). *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry* (Vol. 3). (pp. 49-109). Amsterdam, Holanda: Elsevier.
68. Mettler Toledo. (1997). *Conjunto de determinación de densidades para balanzas AT, Instrucciones de Manejo*. Suiza: Mettler Toledo.

69. Morales, J. (2010). *Introducción a la Ciencia y Tecnología de los Plásticos*. México, México: Trillas.
70. Nadkarni, V. (2002). Recycling of Polyesters. En Fakirov, S. (Ed.). *Handbook of Thermoplastic Polymers: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*. (pp. 1223-1250). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
71. Nadkarni, V. y Rath, A. (2002). Blends of Thermoplastic Polyesters. En Fakirov S. (Ed.). *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*. (pp. 833-894). Verlag, Alemania: Wiley-VCH.
72. Naranjo, A., Noriega, M., Sanz, J. y Sierra, J. (2001). *Extrusion Processing Data*. Munich, Alemania: Hanser.
73. Netzsch Corporation. (2010). *Software Manual DSC Instruments, Temperature and Sensitivity Calibration*. Berlin: Netzsch Ed.
74. Nexant. (2009). *Nylon 6 and Nylon 6,6*. Recuperado de http://www.chemsystems.com/reports/search/docs/abstracts/0708S6_abs.pdf. (Diciembre, 2012).
75. Olusesan , F., Rotimi, E., Sadiku, O. y Taoreed, A. (2011). Rheological Properties of Polymers: Structure and Morphology of Molten Polymer Blends. *Materials Sciences and Applications*, 2(1), 30-41. doi:10.4236/msa.2011.21005.
76. Ossietzky, U. O. (2006). *Industrial Chemistry*. Recuperado de <http://www.gmehling.chemie.uni-oldenburg.de/16633.html> (Enero, 2013).
77. Plastics Europe Market Research Group. (Diciembre de 2012). *Thermoplastics Resin - A Global Market Watch, 2011*. Recuperado de

http://www.reseauplasturgie.ch/fileadmin/user_upload/pdf/conference/jt2012/exposes/09.20_Schorr_Kunststofftagung%20Presentation_EN.pdf (Febrero, 2013).

78. Polinter. (2011). *Consideraciones Básicas del Proceso de Mezclado*. Recuperado de http://www.polinter.com.ve/publicaciones/boletines/consideraciones_basicas_del_proceso_de_mezclado.pdf (Abril, 2012).
79. Radusch, H. (2002). Poly(Butylene Terephthalate). En Fakirov S. (Ed.). *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites* (Vol. I). (pp. 389-420). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
80. Rauwendaal, C. (1998). *Polymer Mixing: A Self-Study Guide*. Munich, Alemania: Hanser.
81. Rauwendaal, C. (2001). *Polymer Extrusion* (4ta. ed.). Munich, Alemania: Hanser.
82. Reliance Industries Limited. (2003). *Drying RELPET*. Recuperado de <http://www.ril.com/cmshtml/drying.pdf> (Noviembre, 2012).
83. Robeson, L. (2007). *Polymer Blends*. Recuperado de http://www.christiani.in/pdf/84430_probe.pdf (Mayo, 2012).
84. Roder, T. (1995). Drying Nylons. En Kohan M. (Ed.). *Nylons Plastics Handbook*. (194-198). Munich, Alemania: Hanser.
85. Roder, T. (1995). Importance of Moisture. En M. Kohan, *Nylon Plastics Handbook*. (171-173). Munich, Alemania: Hanser.
86. Rosato, D. (1998). *Extruding Plastics, A practical processing handbook*.

Londres, Inglaterra: Chapman & Hall.

87. Rosato, D. y Rosato, D. (1998). *Blow Molding Handbook*. Munich, Alemania: Hanser.
88. Scheirs, J. (2000). *Compositional and Failure Analysis of Polymers*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.
89. Shi, G. y Utracki, L. (2002). Compounding Polymer Blends. En Utracki, L. (Ed.). *Polymer Blends Handbook* (Vol. 1). (pp. 577-652). Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers.
90. Smith, B. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (2da ed.). Boca Raton, Estados Unidos: Taylor & Francis.
91. Spychaj, T. (2002). Chemical Recycling of PET: Methods and Products. En Fakirov, S. *Handbook of Thermoplastic Polymers: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*. (pp. 1251-1290). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
92. Starkweather, H. (1995). Transitions and Relaxations. En Kohan, M. (Ed.). *Nylon Plastics Handbook*. (139-150). Munich, Alemania: Hanser.
93. Stoughton, P. (2000). Drying and Dryers. En Harper C. (Ed.). *Modern Plastics Handbook*. (pp. 7.63-7.98). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
94. Thermo Electron Corporation. (2007). *Laboratory Mixers*. Recuperado de <http://www.mcik.com/data/database/D0004/1140422651254.pdf> (Agosto 2012).
95. Thiele, U. (2007). *Polyester Additives*. Recuperado de www.ce-pip.com/.../Thiele_POLYESTER-ADDI... (Diciembre, 2012).

96. Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011(55), 865–875. doi:10.1016/j.resconrec.2011.04.009.
97. Wuebcken, W. (1995). *International Plastics Handbook* (3ra. ed.). Munich, Alemania: Hanser.
98. 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 DE ESPECIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS

En la Figura AI.1 se muestra la hoja de especificación del poli (etilén tereftalato) grado inyección (PETb).

From +86 755 7804 243 Page 01 Date 03-12-2008 16:06:57
03-DEC-2008 16:17 UIN:V4117 CHEMICALS +43 752 7804 243 HN:1525 S.001/001

**INTRODUCTION
FOR
"JADE" Brand "CZ-328" BOTTLE-GRADE POLYESTER CHIPS**

With development of China's economy and increasingly improvement of the people's living standard, various packing and bottle industry has been developed rapidly. The bottle-grade polyester chips are widely used with the advantages of no poison, no odor, no smell, excellent transparency, high strength & high isolation and good processing feature. Therefore, it becomes the preferred material for package bottles of drinking water, soft drink, non-drink and sheet material industry.

"JADE" Brand "CZ-328" bottle-grade polyester chips are suitable for making packing bottles for carbonated drinks and 3-gallon, 5-gallon big bottles. The product features low heavy metal content, low content of acetaldehyde, good color value, stable viscosity and good for processing. With a unique process recipe and production technology, strengthening the process control and quality management, the brand of new product with excellent isolation property is effective in protecting the carbon dioxide from leaking, good in pressure resistance, low temperature processing, wide scope in processing, excellent in transparency, high in finished product rate and can effectively prevent bottles from breaking for the carbonated drinks which are in storage period and under pressure.

By applying most advanced technology and introducing the powerful equipments from DuPont USA and Buhler Co., Ltd. Switzerland respectively, the plant strictly organizes production and management based on the requirements stipulated in ISO 9002 Quality Guarantee System. The quality of "JADE" Brand serial bottle-grade polyester chips is reliable and worthy to be trusted by all customers.

Quality Indices for JADE" Brand "CZ-328" Bottle-grade Polyester Chips		
Item	Unit	Index
I.V.	dL/g	0.85 ± 0.02
Crystallinity	%	< 60
Color value	L	≥ 83
	b	≤ 0.5
Content of acetaldehyde	PPM	≤ 1.0
Dust content	PPM	≤ 100
Melting point	°C	≤ 245
Wt. of 20 chips	g	0.34 ± 0.01

Figura AI.1. Hoja de especificación del poli (etilén tereftalato) grado inyección (PETb)

En la Figura AI.2 se muestra la hoja de especificación del poli (etilén tereftalato) grado extrusión (PETe).

CERTIFICATE OF ANALYSIS ✓

2009. JULY 11.

PRODUCT	PET S-BRT CHIP	DESTINATION	GUAYAQUIL - ECUADOR	
LOT NO.	V8111	QUANTITY	40,000 KILOS (SKP-080)	
GRADE	AA	TYPE (Serial No.)	1,000kg/Bag	
DESCRIPTION OF GOODS	40,000 KILOS CHIPS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO 100 PCT. POLYESTER CHIP CONTINUOS TYPE, SUPER BRIGHT, RAW WHITE FILAMENT YARN GRADE, FIRST QUALITY, KP CHEMTECH BRAND			
ITEM	UNIT	SPEC	RESULT	REMARKS
INTRINSIC-VISCOSITY	n	0.640±0.01	0.638	
COLOR	L	MAX 60	53.4	
	b	MAX 5.0	2.6	
CEG	EQ/TON	MAX 40	29.9	
DEG	wt%	MAX 1.2	0.80	G.C
M.P	°C	255±3	255.4	DSC
MOISTURE	%	MAX 0.3	0.1	
wt. of 100 chips	g	1.9±10%	1.90	

* ISSUING BANK REFERENCE 000703276 ✓

KPChemtech Corp.

Address : #427-5, SANGGAE-DONG, NAMGU, ULSAN, KOREA
 TEL : (052) 278-3855-3857
 FAX : (052) 278-3860

COD: 11
 11/6/2009
 OASO INTERNATIONAL
 SKP-080

J. J. LEE.

ORIGINAL

ULSAN PLANT
 TECH. TEAM

Figura AI.2. Hoja de especificación del poli (etilén tereftalato) grado extrusión (PETe)

En la Figura A1.3 se muestra la hoja de especificación del poli (butilén tereftalato) con 15 % de fibra de vidrio grado inyección (PBT).

Typical Values
NATURAL

BIPEX *PBT Resins*


Properties	Test conditions	UNIT	ASTM Test Method	BIPEX B0320GN
Mechanical Properties				
Tensile Strength	5 mm/min	kg/cm ²	D 638	1050
Elongation at Break	5 mm/min	%	D 638	2
Flexural strength	2 mm/min	kg/cm ²	D 790	1820
Flexural modulus	2 mm/min	kg/cm ²	D 790	59000
Izod impact strength (notched)	23°C	kg-cm/cm	D 256	8.5
Rockwell Hardness	Scale R Scale M		D 785	120
Thermal Properties				
Temperature of deflection under load	1.8Mpa(264psi)	°C	D 648	211
Miscellaneous Properties				
Specific Gravity			D 792	1.40
Melt Flow Index	275°C, 5 kg	g/10min	D 1238	53
Flammability	1/8"		UL-94	--
Mold shrinkage	Flow Transverse	%		0.2-0.5
Description	PBT 15% GF Reinforced, NC			

*Typical properties can be subject to change without further notice.


Unit Conversion	Tensile Str. Flexural Str. Modulus	ISO9001 ASSURANCE
**	1psi=0.0703 kg/cm ² 1Mpa=10.2 kg/cm ² **	IZOD Impact Strength 1 ft-lb/in = 5.45 kg-cm/cm 1J/m=0.102 kg-cm/cm** Date Issued:2004/09/23 #001.0001

Figura A1.3. Hoja de especificación del poli (butilén tereftalato) grado inyección (PBT)

En la Figura AI.4 se muestra la hoja de especificación de la poliamida 6 grado extrusión (PA6).



케이피켄텍은 섬유용 수지와, FILM, EN-PLA용 수지를 생산하고 있습니다.
 NYLON-6 원료인 카프로락탐은 한국카프로락탐(H.C.C)으로 부터 PIPE LINE을 통해 공급
 받음으로써, 안정적이고 품질이 우수한 제품을 생산하고 있습니다.



01 FILM용 수지 Unveiling separate development purposes PACKAGE CHIP SiO2 amount contained MASTER CHIP commitment with competitive products do not need the film for resin
 MASTER BATCH POLYMERIZATION SiO2 dispersion compared to the product produced in the process of optimizing the unveiling sex
 SiO2 has not committed is a far superior product compared to third-party products and the best in the state, increase the quality FILM Base Chip is capable of producing a separate order,

02 EN-PLA용 수지 ENGINEERING PLASTIC Compounding for resin products, as well as low viscosity, high viscosity (2.3 to 3.2) produced a huge variety and are being sold for a variety of purposes, such as automobile interior, ENGINE COVER,

03 섬유용 수지 Fiber for resin production, and SD CHIP HOMOGENEOUS POLYMER developed to increase the radioactive product;

(2) Nylon 6 Polymer for Textile, Technical Yarn

Type	Unit	For Technical yarn	For Textile		Remarks
			Semi Dull	Bright	
Relative Viscosity		3.27 ± 0.03	2.49 ± 0.03	2.5 ± 0.1	
Moisture Content	%	Max. 0.07	Max. 0.07	Max. 0.07	
Ash Content	%	0.15 ± 0.03	0.38 ± 0.03	Max. 0.03	
Color b		Max. -1.0	Max. 1.5	Max. -1.0	
Melting Point	℃	224 ± 3	224 ± 3	224 ± 3	
Chip Size	gram/100EA	0.82 ± 10%	0.57 ± 10%	0.82 ± 10%	

Figura AI.4. Hoja de especificación de la poliamida 6 (PA6)

ANEXO II

DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

En las siguientes tablas se muestran los valores experimentales obtenidos para el cálculo de la densidad bajo la norma ASTM D 792-08:

Tabla AII.1. Valores obtenidos para el cálculo de la densidad de los materiales puros

	PETb		PETe		PBT		PA6	
	a(g)	b(g)	a(g)	b(g)	a(g)	b(g)	a(g)	b(g)
1	0,1027	0,0273	0,1088	0,0268	0,1176	0,0329	0,1022	0,0147
2	0,1018	0,0289	0,1035	0,0255	0,1119	0,0319	0,1031	0,0134
3	0,1142	0,0318	0,1198	0,029	0,1029	0,0277	0,1058	0,0135
T (°C)	19,5		19		21,5		19	
* ρ_o (g/cm ³)	0,99833		0,99843		0,99791		0,99843	

* ρ_o = densidad del líquido de inmersión a la temperatura señalada; a= peso del espécimen suspendido en el aire; b= peso del espécimen sumergido (Mettler Toledo, 1997, p.70)

Tabla AII.2. Valores obtenidos para el cálculo de la densidad de los materiales reciclados

	PETr		PBTr	
	a(g)	b(g)	a(g)	b(g)
1	0,1072	0,0245	0,1049	0,0341
2	0,1042	0,0212	0,1085	0,0343
3	0,1036	0,0208	0,1023	0,0317
T (°C)	21		25	
* ρ_o (g/cm ³)	0,99802		0,99707	

Ejemplo de cálculo:

Para el cálculo de la densidad, se utilizó la ecuación AII.1:

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_0 \quad [\text{AII.1}]$$

Donde:

ρ = densidad (g/cm^3)

A = Peso del sólido en el aire (g)

B = peso del sólido en el agua destilada (g)

ρ_0 = densidad del agua destilada a temperatura ambiente (g/cm^3)

Para PETb:

$$\rho = \frac{0,1027 \text{ g}}{0,1027 \text{ g} - 0,0273 \text{ g}} \times 0,99833 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1,36 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

ANEXO III

**DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DEL
CONTENIDO DE CENIZAS**

En las siguientes tablas se muestran los valores experimentales obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos bajo la norma ASTM D 5630-08:

Tabla AIII.1. Valores obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos de PETB y PETe

	PETb			PETe		
	1	2	3	1	2	3
peso muestra inicial (g)	5,0065	5,0045	5,0056	5,0139	5,0107	5,0066
peso crisol vacío (g)	33,7199	38,4302	37,1975	32,0293	34,5406	37,2007
peso crisol con ceniza (g)	33,7227	38,4339	37,2004	32,0304	34,5418	37,2017

Tabla AIII.2. Valores obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos de PBT y PA6

	PBT			PA6		
	1	2	3	1	2	3
peso muestra inicial (g)	10,0027	10,0026	10,0179	10,0081	10,0065	10,0123
peso crisol vacío (g)	38,4267	35,1274	35,3946	32,0308	34,5396	37,2001
peso crisol con ceniza (g)	39,9612	34,5418	37,2017	32,0544	34,5622	37,2231

Tabla AIII.3. Valores obtenidos para el cálculo del contenido de inorgánicos de PETbr y PBr

	PETbr			PBr		
	1	2	3	1	2	3
peso muestra inicial (g)	5,0898	5,0157	5,0659	5,0077	5,0324	5,0442
peso crisol vacío (g)	39,8131	33,1904	38,8673	39,8069	38,8665	34,5134
peso crisol con ceniza (g)	39,9125	33,2893	38,9659	41,4751	40,5471	36,2038

Ejemplo de Cálculo:

Para el cálculo del contenido de inorgánicos, se utilizó la ecuación AIII.1:

$$\text{Porcentaje de inorgánicos(\%)} = \frac{\text{peso del crisol con ceniza} - \text{peso del crisol vacío}}{\text{peso de la muestra inicial}} \times 100 \quad [\text{AIII.1}]$$

Para PETb:

$$\text{Porcentaje de inorgánicos (\%)} = \frac{33,7227 \text{ g} - 33,7199 \text{ g}}{5,0065 \text{ g}} \times 100 = 0,06 \%$$

ANEXO IV

PROCEDIMIENTO EFECTUADO PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS CALORÍMETROS NETZSCH DSC 204 F1 PHOENIX Y SHIMADZU DSC50

a) Calibración del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix

Para la calibración del equipo se utilizaron cinco estándares de alta pureza, los mismos que se detallan en la Tabla AIV.1.

Tabla AIV.1. Estándares utilizados para la calibración del calorímetro Netzsch DSC 204 F1 Phoenix

ESTÁNDARES	PUREZA (%)
Hg	99,99
In	99,999
Sn	99,99
Bi	99,999
Zn	99,999

Para cada estándar se realizaron los barridos indicados en la Tabla AIV.2. En la calibración, la velocidad de calentamiento utilizada fue de 10 °C/min y el flujo de nitrógeno de 20 mL/min.

Para la evaluación de los resultados obtenidos, se empleó el software del equipo, el cual utiliza los siguientes métodos:

- El método de las tangentes especificado en el literal 10 de la norma ASTM D3418-08, para la determinación de la temperatura de transición vítrea, y
- El método detallado en el literal 11 de la ASTM D3418-08 para el cálculo del área del pico de fusión

Tabla AIV.2. Barridos realizados para los estándares de calibración del calorímetro
Netzsch DSC 204 F1 Phoenix

ESTÁNDAR	BARRIDOS	ESTÁNDAR	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	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
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	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		

Calibración de temperatura

La temperatura fue calibrada mediante el uso de la temperatura onset de fusión, para lo cual se determinaron los valores promedio para cada estándar mediante el uso de los dos últimos calentamientos. Los resultados se detallan en la Tabla AIV.3.

Los valores de temperatura de fusión onset promedio fueron ingresados en el programa de calibración del equipo en la columna denominada Temp exp. En la columna Temp nom se desplegaron los valores de temperatura onset referenciales de cada estándar y la columna Mathematical Weight se usó para dar forma a la curva de calibración, para lo cual se consideró que el In debe tener el mayor peso matemático. Posteriormente el software calculó una temperatura corregida.

Tabla AIV.3. Temperatura onset de fusión de los estándares de calibración

ESTÁNDAR	TEMPERATURA ONSET (°C)		T ONSET PROMEDIO (°C)
	2° CALENTAMIENTO	3° CALENTAMIENTO	
Hg	-37,5	-37,6	-37,55
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	418,85

La tabla que el programa desplegó para la calibración de temperatura se aprecia en la Figura AIV.1.

	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 AIV.1. Programa para calibración de la temperatura del calorímetro Netzsch

El software graficó los valores (Temp nom. – Temp exp) vs Temp exp para obtener la curva de calibración de temperatura, la cual se muestra en la Figura AIV.. Según el manual del equipo, debe existir una diferencia máxima de ± 3 °C entre Temp nom y Temp corr para que la curva de calibración sea aceptada como válida.

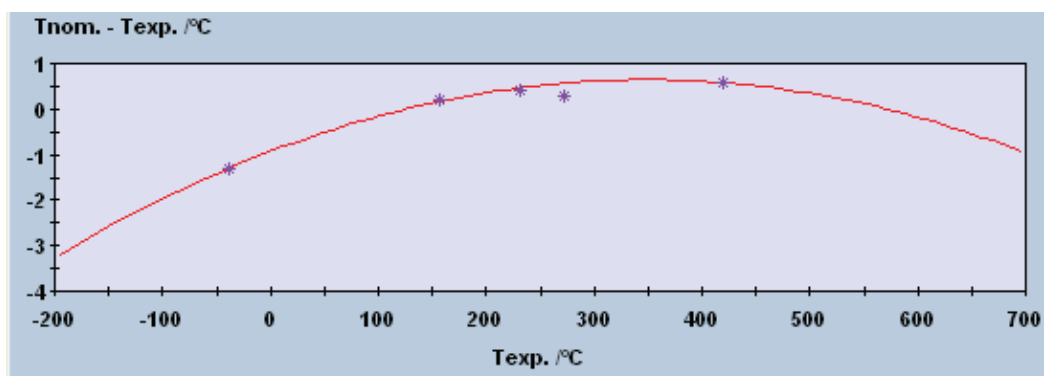


Figura AIV.2. Curva de calibración de temperatura para el calorímetro Netzsch

En la Tabla AIV.4 se observa la diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura corregida para cada estándar. Como se puede observar, todos los valores obtenidos se encontraron dentro del rango permitido, es decir, las diferencias fueron menores a los ± 3 °C, por lo tanto se consideró al equipo calibrado dentro de los rangos de temperatura establecidos.

Tabla AIV.4. Diferencia entre la temperatura de referencia (Temp. nom.) y la temperatura corregida (Temp. corr.) para cada estándar

ESTÁNDAR	TEMPERATURA (°C)		Temp. nom. – Temp. corr. (°C)
	nom.	corr.	
Hg	-38,8	-38,8	0
In	156,6	156,6	0
Sn	231,9	232	-0,1
Bi	271,4	271,7	-0,3
Zn	419,5	419,5	0

Calibración de entalpía

Se determinaron las áreas de los picos de fusión en cada termograma de los estándares, las mismas que se detallan en la Tabla AIV.5. Al igual que el caso de la temperatura, se utilizaron los valores promedio de los dos últimos calentamientos

Tabla AIV.5. Áreas de los picos de fusión de los estándares de calibración

Estándar	Área del Pico (uV*s/mg)		Área promedio (uV*s/mg)
	2° Calentamiento	3° Calentamiento	
Hg	-39,06	-39,07	-39,065
In	-104,8	-104,9	-104,85
Sn	-201,7	-201,7	-201,7
Bi	-169,3	-169,1	-169,2
Zn	-293,5	-295,5	-294,5

Para la calibración de la entalpía, los valores promedio del área del pico de fusión se ingresaron en el programa de calibración del equipo en la columna denominada Peak Area y a su vez el software del equipo desplegó las columnas Sensit Exp y Sensit Calc. Como se hizo para la temperatura, la columna Mathematical Weight, se usó para dar forma a la curva de calibración, de forma que el In tenga el mayor peso matemático. La tabla que el programa desplegó para la calibración de entalpía se aprecia en la Figura AIV.3.

	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 AIV.3. Programa para calibración de la entalpía del calorímetro Netzsch

El software graficó Sensivity vs Temp para conseguir la curva de calibración de entalpía, la cual se muestra en la Figura AIV.4. Según el manual del equipo, debe existir una desviación entre la sensibilidad calculada y la experimental de máximo un 3 % para que la curva de calibración sea aceptada como válida.

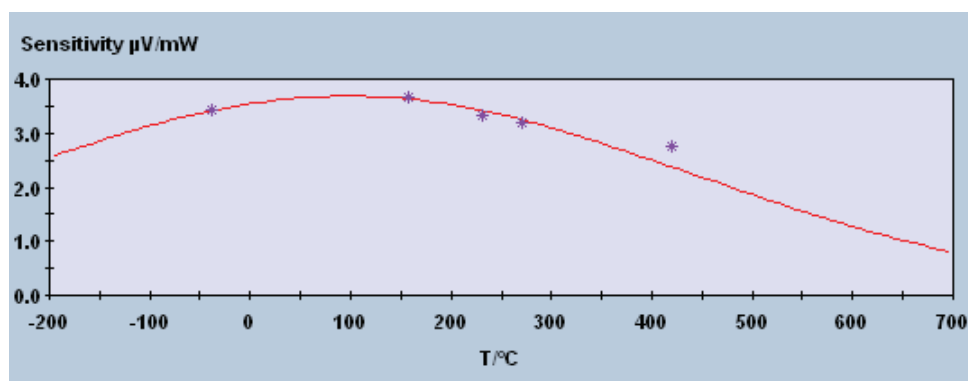


Figura AIV.4. Curva de calibración de entalpía para el calorímetro Netzsch

En la Tabla AIV.6 se observa la diferencia entre la Sensitividad calculada y la Sensitividad experimental para cada estándar. Como se observa en la columna final, a excepción del Zn, las desviaciones del valor de la sensibilidad de los estándares fueron menores al 3 %, es decir cumplieron con el parámetro indicado por el manual de calibración del equipo. El Zn cuya temperatura onset de fusión es de 419 °C, presentó una desviación del 15,22 %, lo cual podría deberse a impurezas presentes en la muestra; sin embargo, esto no afectó a la calibración del equipo debido a que los materiales con los que se trabajó poseen temperaturas de fusión de hasta 300 °C como máximo, y en este rango la curva de calibración se ajustó perfectamente, por lo tanto se consideró al equipo calibrado en los rangos establecidos de entalpía.

Tabla AIV.6. Diferencia entre la Sensitividad calculada (Sensit. Calc.) y la Sensitividad experimental (Sensit. Exp.) para cada estándar de calibración

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

Los termogramas obtenidos para la calibración del equipo se encuentran en el Anexo V.

b) Calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50

Se utilizaron cinco estándares de alta pureza, los mismos que se detallan en la Tabla AIV.7.

Tabla AIV.7. Estándares utilizados para la calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50

ESTÁNDARES	PUREZA (%)
Ácido benzoico Merck grado analítico	99,99
In	99,999
Sn	99,99
Bi	99,999
Zn	99,999

Para cada estándar se realizaron los barridos indicados en la Tabla AIV.8. Como en la calibración del equipo anterior, la velocidad de calentamiento utilizada fue de 10 °C/min y el flujo de nitrógeno de 20 mL/min y de igual forma para la evaluación, se empleó el software del equipo, el cual utiliza los métodos basados en la norma ASTM D3418-08 para la determinación de la temperatura onset y la entalpía de fusión. En este caso, se tomaron los valores de todos los calentamientos con el fin de determinar los parámetros antes mencionados.

Tabla AIV.8. Barridos realizados para los estándares de calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50

ESTÁNDAR	BARRIDOS	ESTÁNDAR	BARRIDOS
Acido Benzoico	Calentamiento: 20 °C a 180 °C Enfriamiento: 180 °C a 60 °C Calentamiento: 60 °C a 180 °C Enfriamiento: 180 °C a 60 °C Calentamiento: 60 °C a 180 °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
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	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		

Calibración de temperatura

Al igual que en la calibración del equipo anterior, se determinaron las temperaturas onset de fusión en cada termograma de los estándares, las mismas que se detallan en la Tabla AIV.9. Inicialmente estos ensayos se hicieron con el fin de evaluar el estado inicial del equipo, pero debido al porcentaje de error encontrado, de alrededor del 1% en la mayoría de estándares, se consideró que era necesaria la calibración

Tabla AIV.9. Temperatura onset de fusión de los estándares de calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50

Estándar	TEMPERATURA ONSET DE FUSIÓN (°C)					
	1° Calentamiento	2° Calentamiento	3° Calentamiento	Promedio	Teórica	Error (%)
Ácido Benzoico	122,96	123,48	123,31	123,25	122,35	0,74
In	155,91	156,28	156,01	156,07	156,6	0,34
Sn	230	229,89	230,33	230,07	231,9	0,85
Bi	269,31	269,08	268,85	269,08	271,4	0,85
Zn	413,07	413,29	412,92	413,09	419,5	1,53

Los valores de temperatura experimental de fusión onset promedio fueron ingresados en el programa de calibración del equipo en la columna denominada Measured-T(C) y en la columna Expected-T(C) se ingresaron los valores teóricos de temperatura de fusión onset, posteriormente el software realizó la calibración con los valores ingresados. La tabla que el programa despliega para la calibración de temperatura se aprecia en la Figura AIV.5.

	Expected-T[C]	Measured-T[C]
1	156.60	156.07
2	231.90	230.07
3	419.50	413.09
4	122.35	123.25
5	0.00	0.00
6	0.00	0.00
7	0.00	0.00

Figura AIV.5. Programa para calibración de temperatura del calorímetro Shimadzu DSC

Calibración de la entalpía

Se determinaron las entalpías de fusión en cada termograma de los estándares, las mismas que se detallan en la Tabla AIV.10.

Tabla AIV.10. Áreas de los picos de fusión de los estándares de calibración del calorímetro Shimadzu DSC 50

Estándar	ENTALPIA DE FUSIÓN (J/g)					
	1° calentamiento	2° calentamiento	3° calentamiento	Promedio	Teórica	Error (%)
Ácido Benzoico	132,64	130,66	128,47	130,59	147,20	11,29
In	29,23	29,05	29,15	29,14	156,60	1,90
Sn	60,98	60,48	60,78	60,75	60,50	0,41
Bi	52,07	52,61	52,85	52,51	53,10	1,11
Zn	98,32	99,17	98,87	98,79	107,50	8,11

Como muestran los datos reportados, el porcentaje de error del 8,11 % correspondiente al Zn y del 1,90 % del In, indicaron que era necesaria la calibración del equipo. El error en la entalpía de fusión del 11,29 % en el ácido benzoico se debió a la dificultad para determinar el área de su pico de fusión. Al fundirse el estándar se sublimó y como consecuencia no hubo una estabilidad de la línea base, lo cual hizo difícil determinar las temperaturas onset y final de fusión. Para evitar que estos porcentajes de error afecten a los resultados, se realizó la calibración de entalpía con los cuatro estándares restantes.

Para la calibración de la entalpía, se siguió el procedimiento detallado en el manual del equipo. Se graficaron los valores de (entalpía de teórica/entalpía de fusión experimental promedio) vs temperatura onset de fusión de cada estándar y de esta forma se obtuvo una curva, la misma que se muestra en la Figura AIV.6.

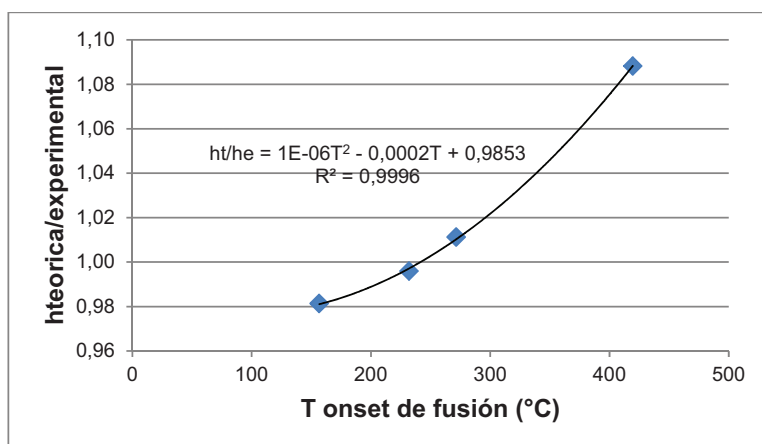


Figura AIV.6. Curva de calibración de entalpía para el del calorímetro Shimadzu DSC 50

Como se observa en la Figura AIV.6, los datos tuvieron una tendencia cuadrática tal y como se especificaba en el manual del equipo. La correlación que presentaron los datos fue de $R^2 = 0,9996$, lo cual aseguró la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación que se usó para la calibración de la entalpía.

Los coeficientes de la ecuación de la curva fueron introducidos en el programa del equipo y posteriormente, el software realizó la calibración del mismo. La tabla que el programa muestra para la calibración de la entalpía se observa en la Figura AIV.7.

La imagen muestra una ventana de software titulada "Heat Correction". En el centro se muestra la ecuación $Q = [a + bT[C] + cT[C]^2] \times Q_m$. Debajo de la ecuación, se muestran tres campos de entrada para los coeficientes: $a = 0.989600$, $b = -0.000200000$ y $c = 1.00000E-006$. En la parte inferior de la ventana hay dos botones: "OK" y "Cancel".

Figura AIV.7. Programa para calibración de entalpía del calorímetro Shimadzu DSC 50

Los termogramas obtenidos para la calibración del equipo se encuentran en el Anexo VI.

ANEXO V

**TERMOGRAMAS OBTENIDOS PARA LA CALIBRACIÓN Y
VALIDACIÓN DEL CALORÍMETRO NETZSCH DSC 204 F1
PHOENIX**

En las siguientes figuras se muestran los termogramas obtenidos de la calibración del equipo con los estándares. El segundo calentamiento corresponde a la línea azul y el tercero a la roja.

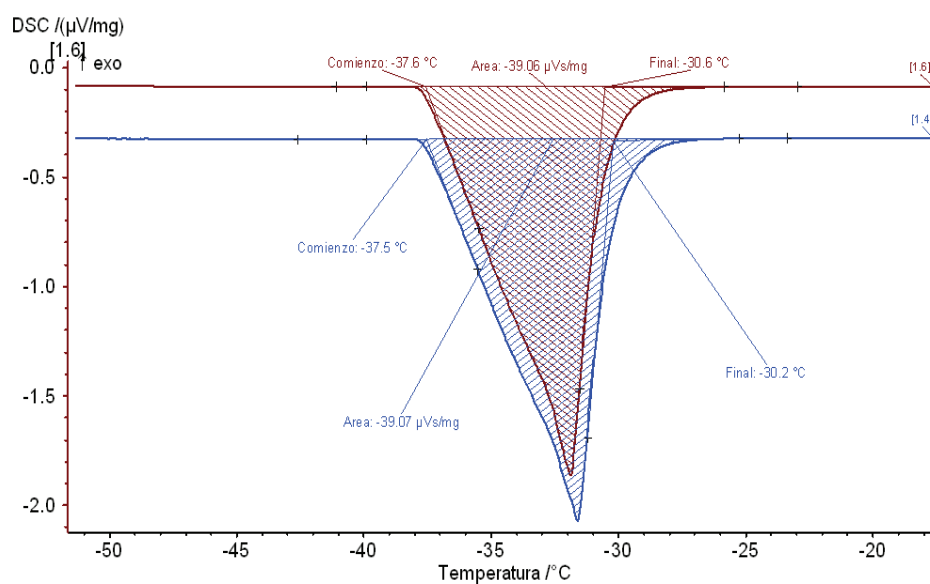


Figura AV.1. Termogramas del segundo y tercer barrido de Hg (calibración)

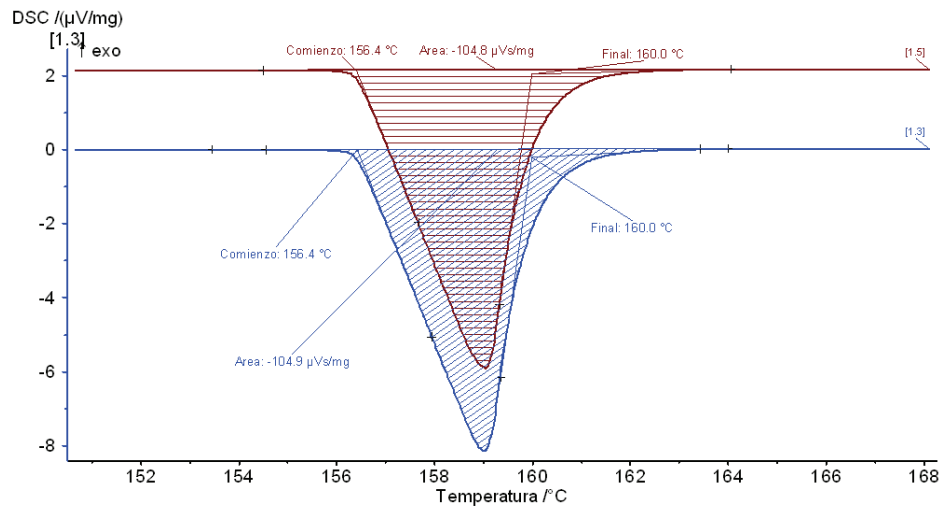


Figura AV.2. Termogramas del segundo y tercer barrido de In (calibración)

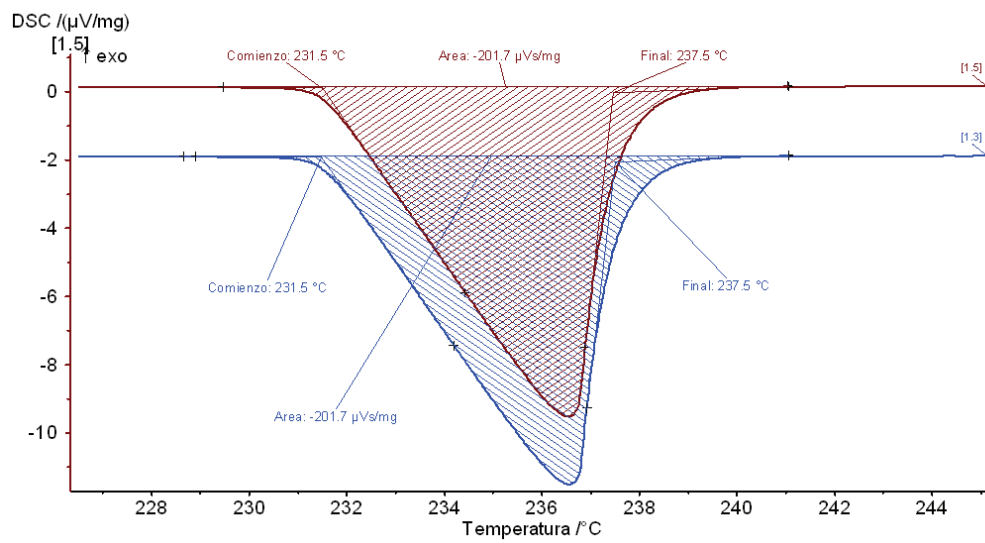


Figura AV.3. Termogramas del segundo y tercer barrido de Sn (calibración)

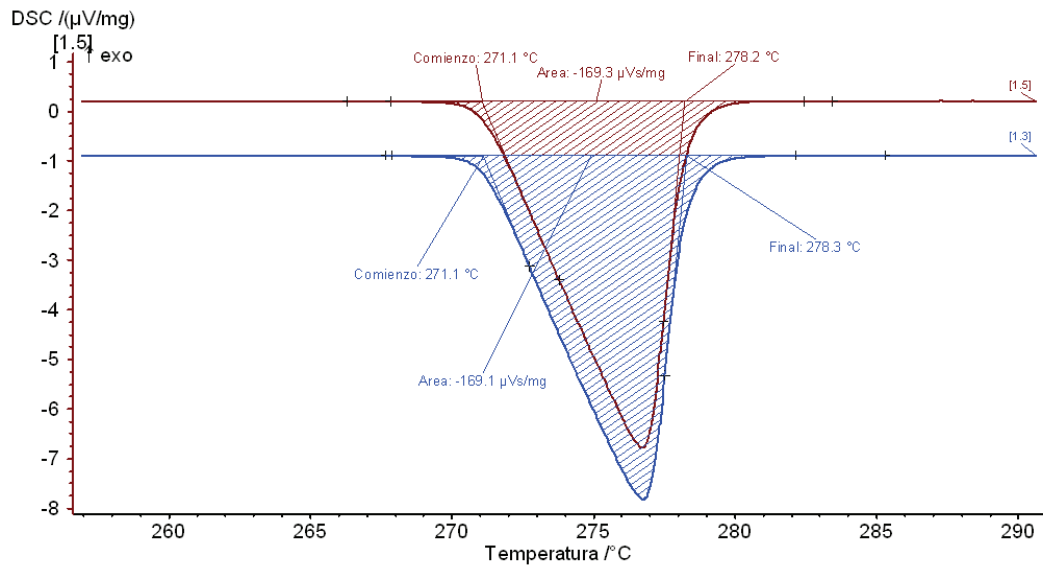


Figura AV.4. Termogramas del segundo y tercer barrido de Bi (calibración)

En las siguientes figuras se muestran los termogramas obtenidos de la validación del equipo con los estándares. El primer calentamiento corresponde a la línea azul, el segundo a la roja y el tercero a la verde.

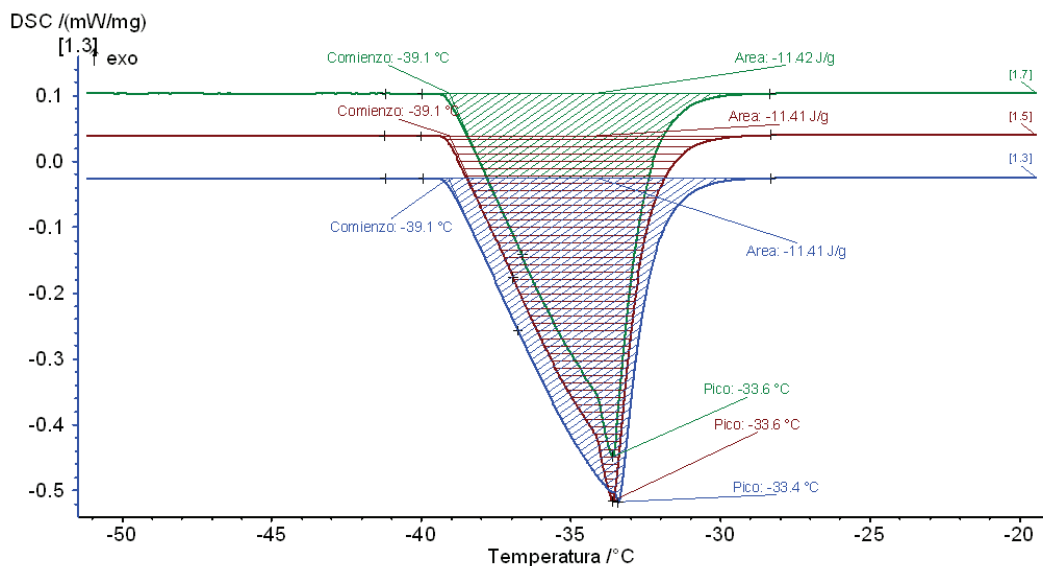


Figura AV.5. Termogramas obtenidos de la validación con Hg

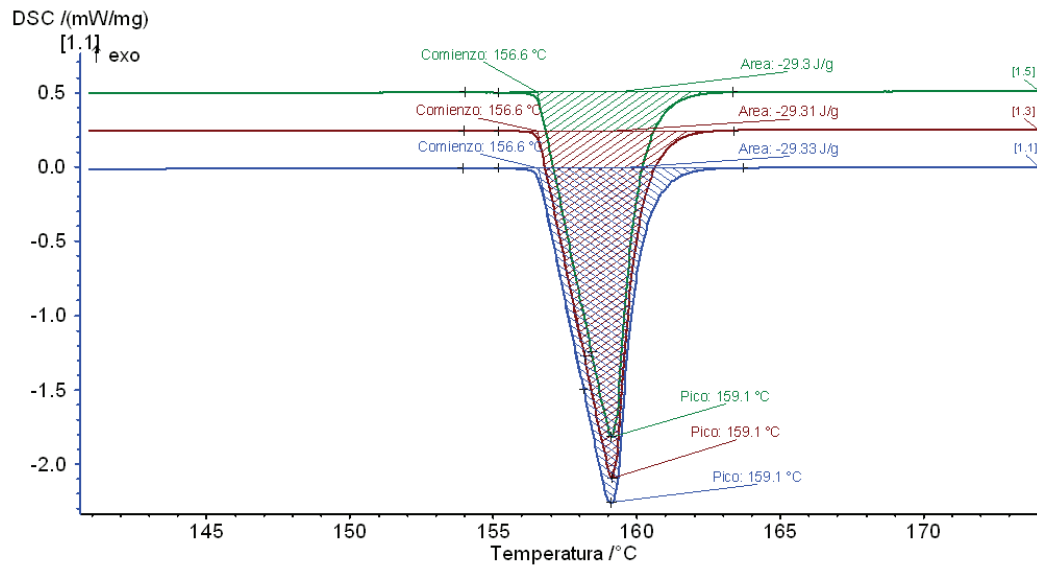


Figura AV.6. Termogramas obtenidos de la validación con In

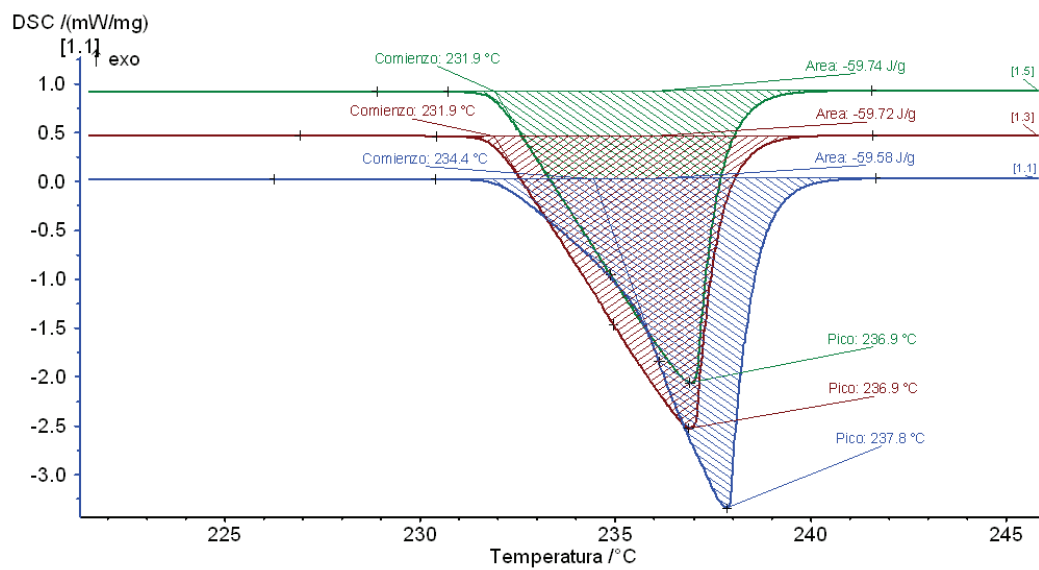


Figura AV.7. Termogramas obtenidos de la validación con Sn

ANEXO VI

TERMOGRAMAS OBTENIDOS PARA LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL CALORÍMETRO SHIMADZU DSC 50

En las siguientes figuras se muestran los termogramas obtenidos para la calibración del equipo con los estándares.

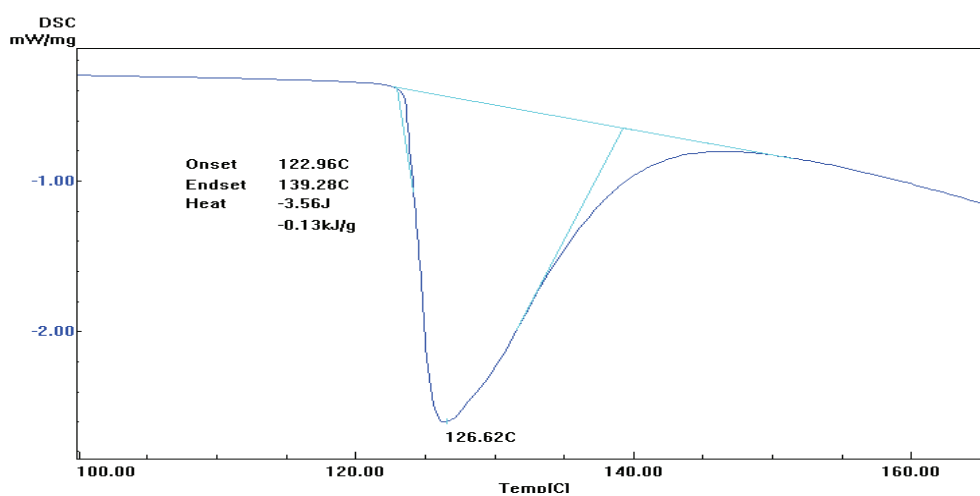


Figura AVI.1. Termograma del primer barrido de ácido benzoico (calibración)

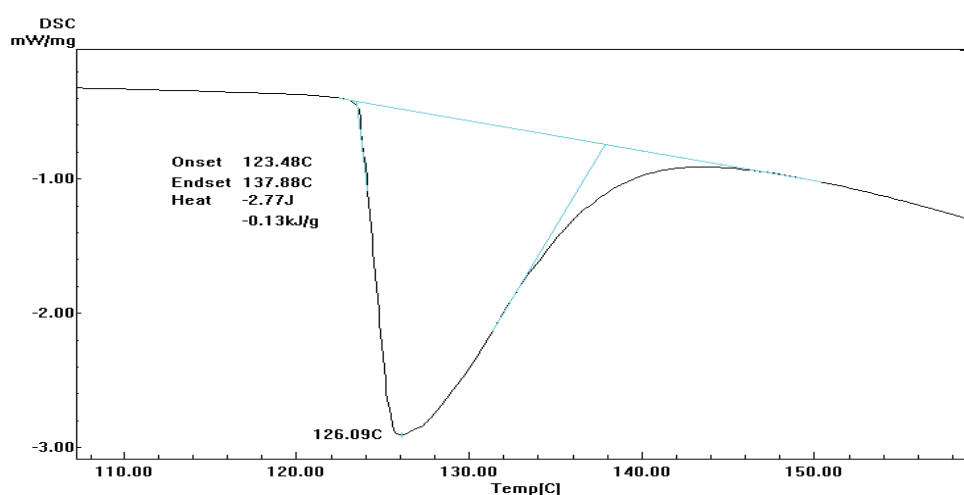


Figura AVI.2. Termograma del segundo barrido de ácido benzoico (calibración)

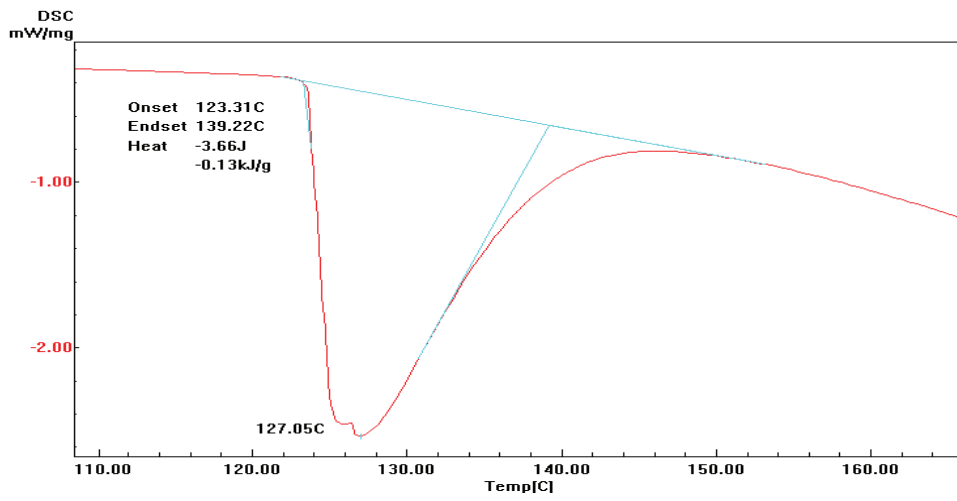
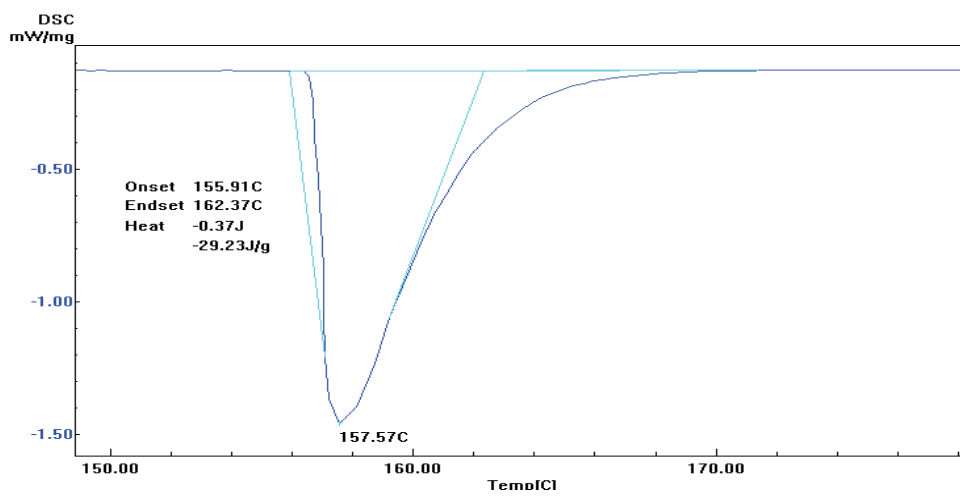


Figura AVI.3. Termograma del tercer barrido de ácido benzoico (calibración)



.Figura AVI.4. Termograma del primer barrido de In (calibración)

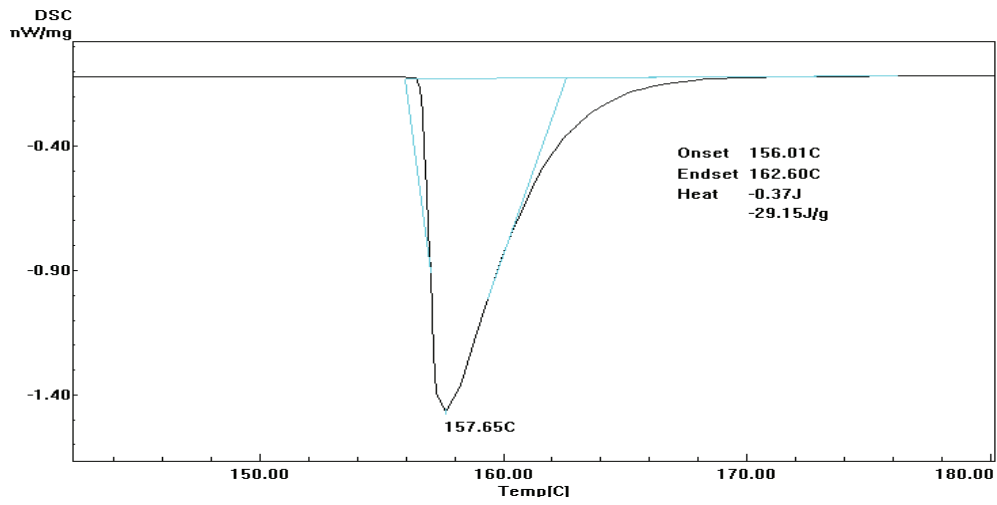


Figura AVI.5. Termograma del segundo barrido de In (calibración)

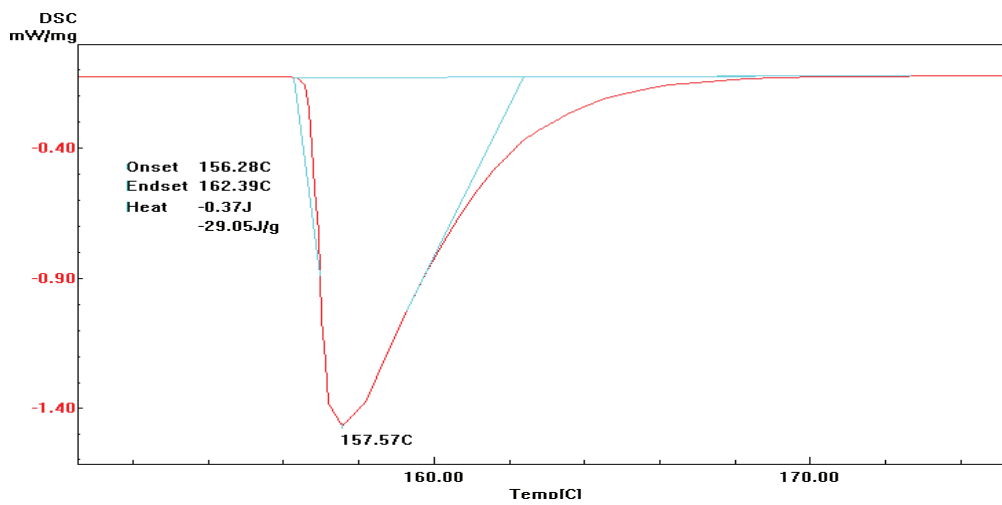


Figura AVI.6. Termograma del tercer barrido de In (calibración)

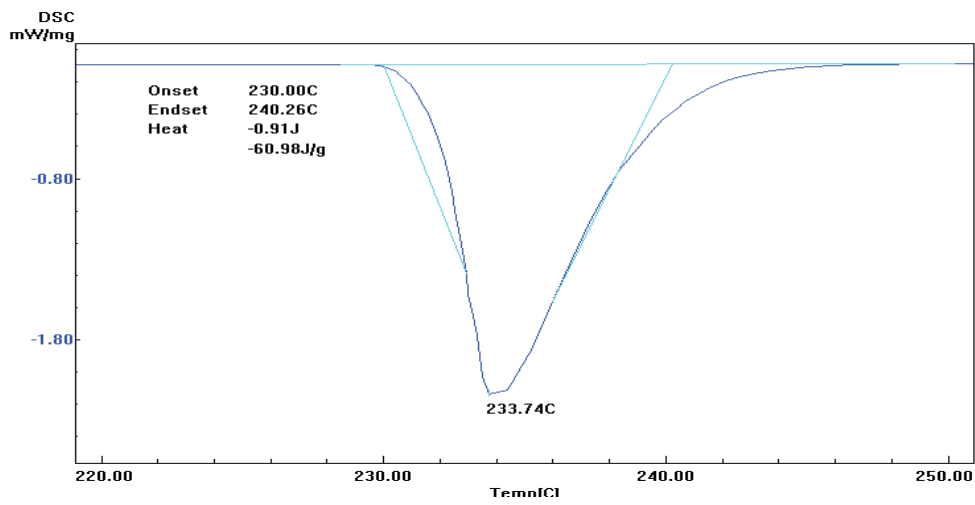


Figura AVI.7. Termograma del primer barrido de Sn (calibración)

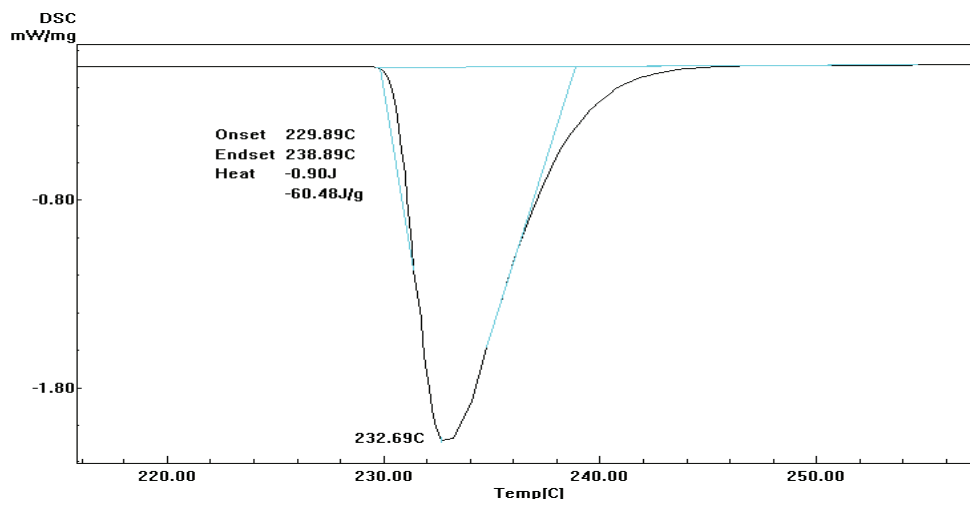


Figura AVI.8. Termograma del segundo barrido de Sn (calibración)

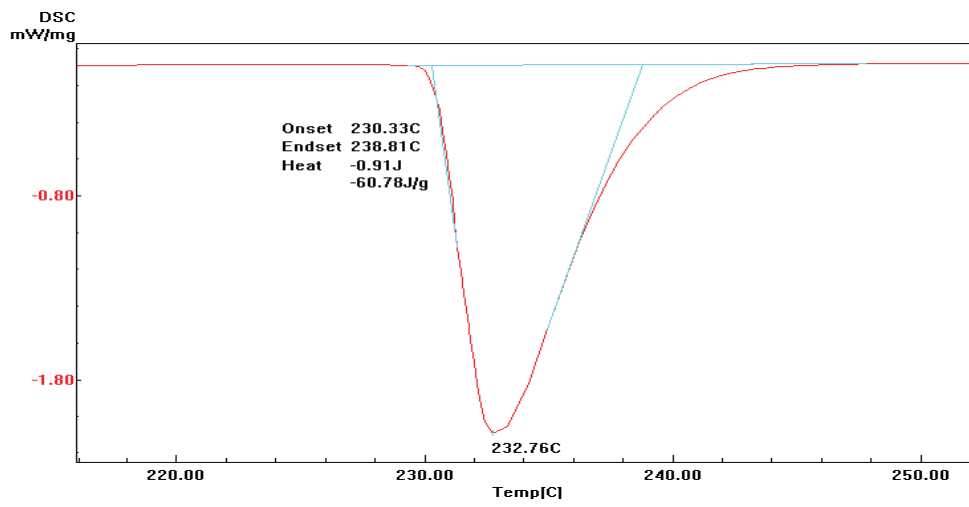


Figura AVI.9. Termograma del tercer barrido de Sn (calibración)

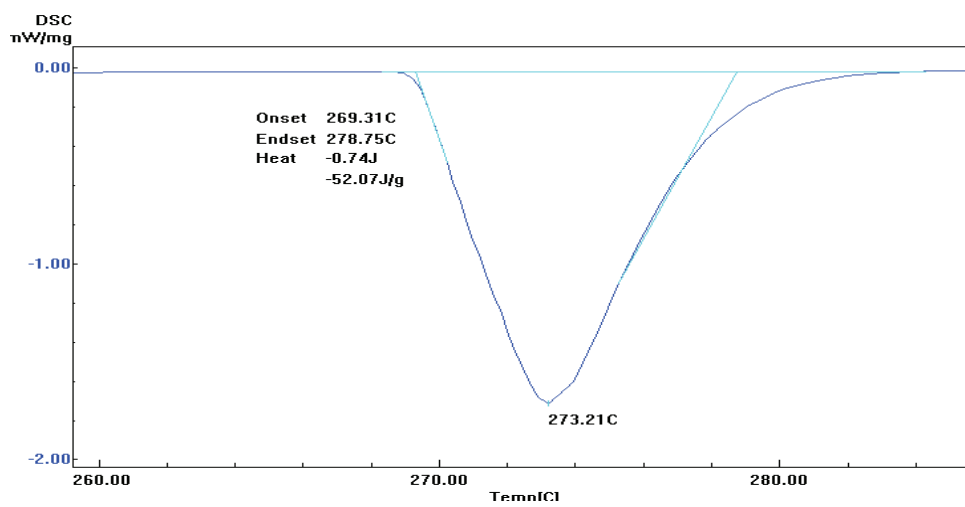


Figura AVI.10. Termograma primer barrido de Bi (calibración)

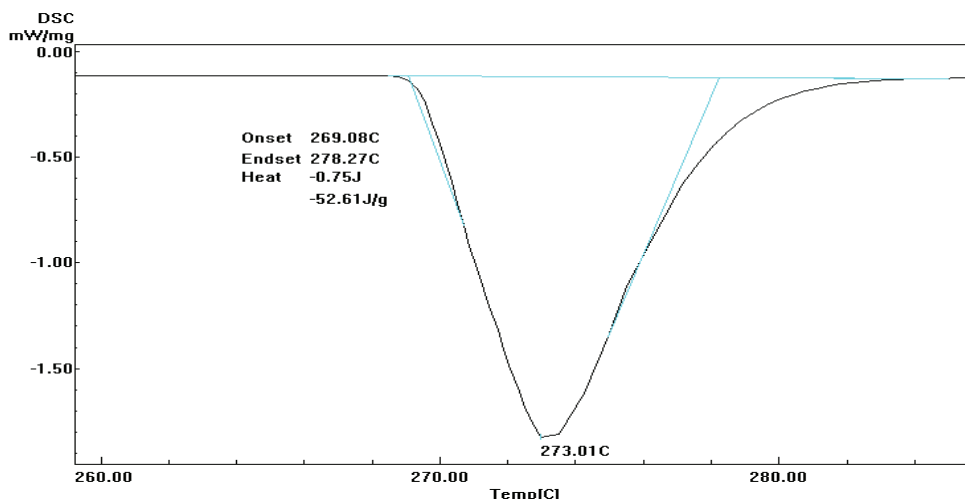


Figura AVI.11. Termograma del segundo barrido de Bi (calibración)

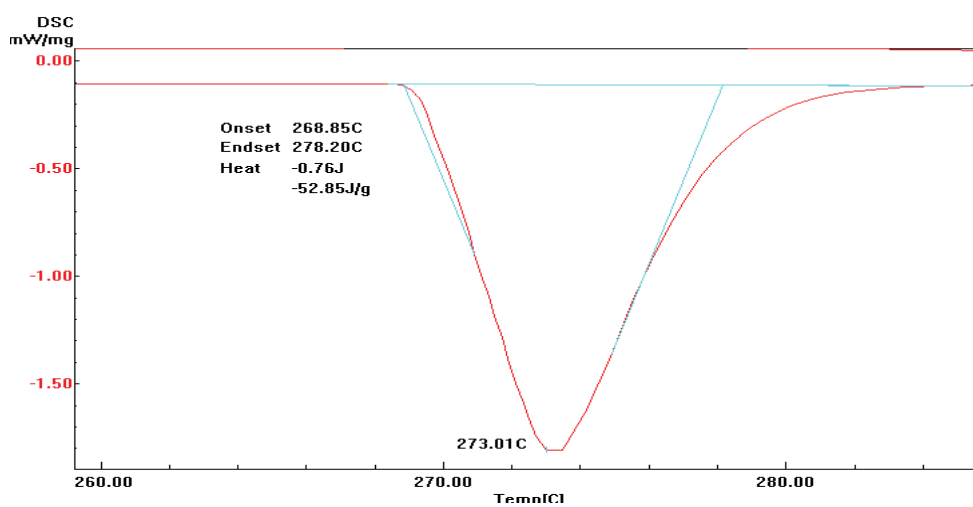


Figura AVI.12. Termogramas del tercer barrido de Bi (calibración)

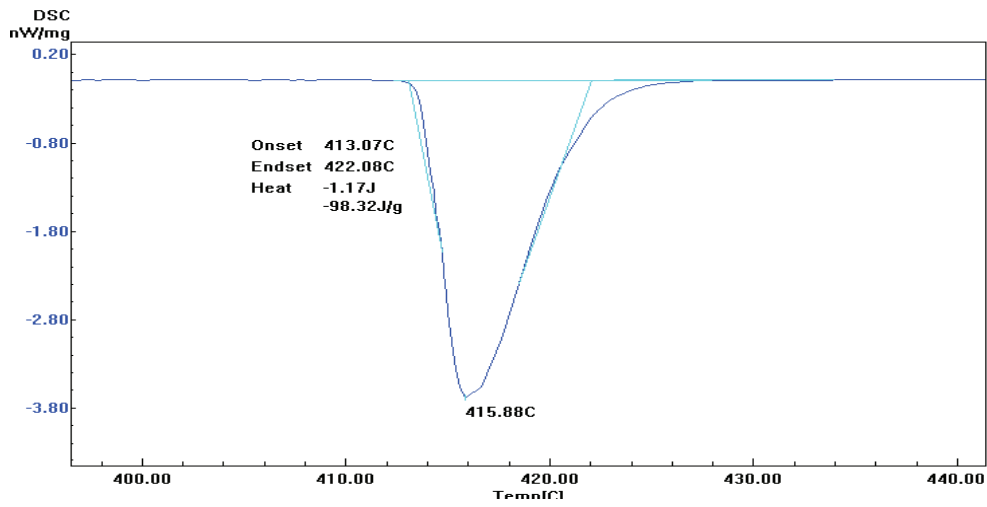


Figura AVI.13. Termograma del primer barrido de Zn (calibración)

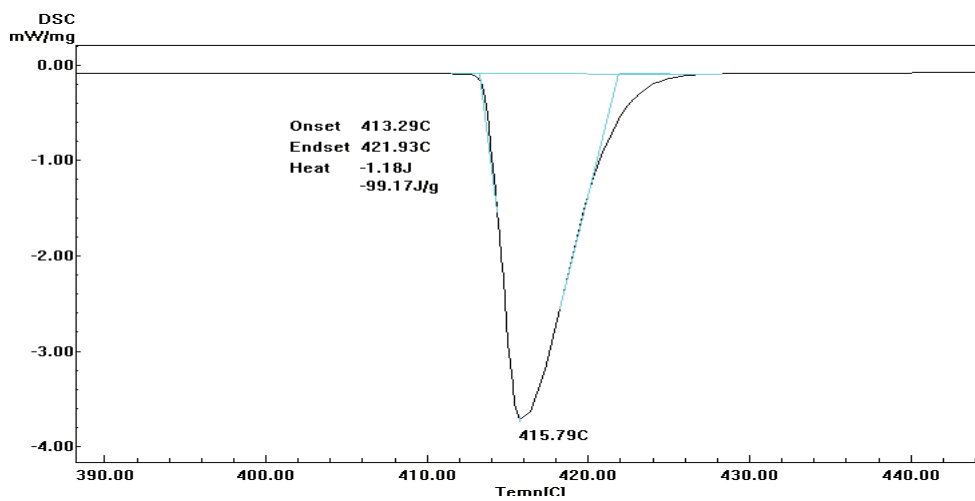


Figura AVI.14. Termograma del segundo barrido de Zn (calibración)

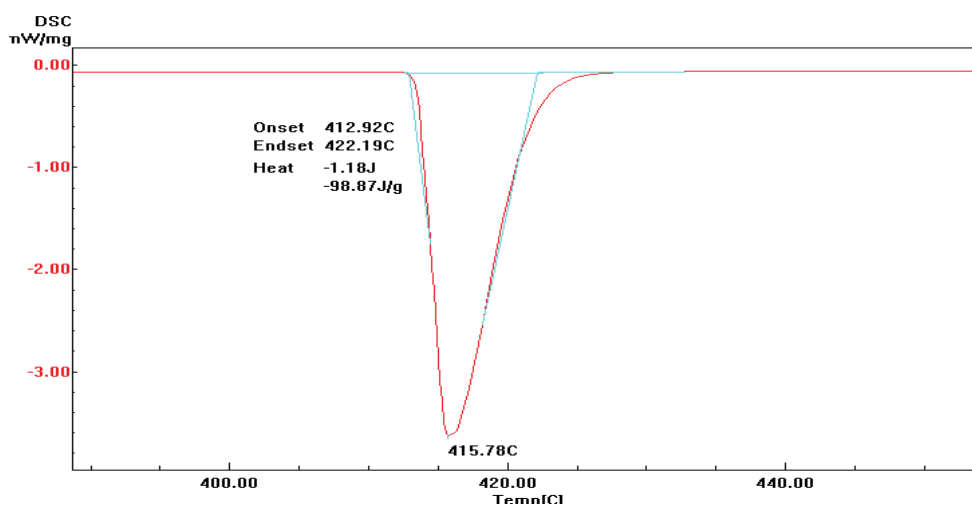


Figura AVI.15. Termograma del tercer barrido de Zn (calibración)

En las siguientes figuras se muestran los termogramas obtenidos de la validación del equipo con los estándares.

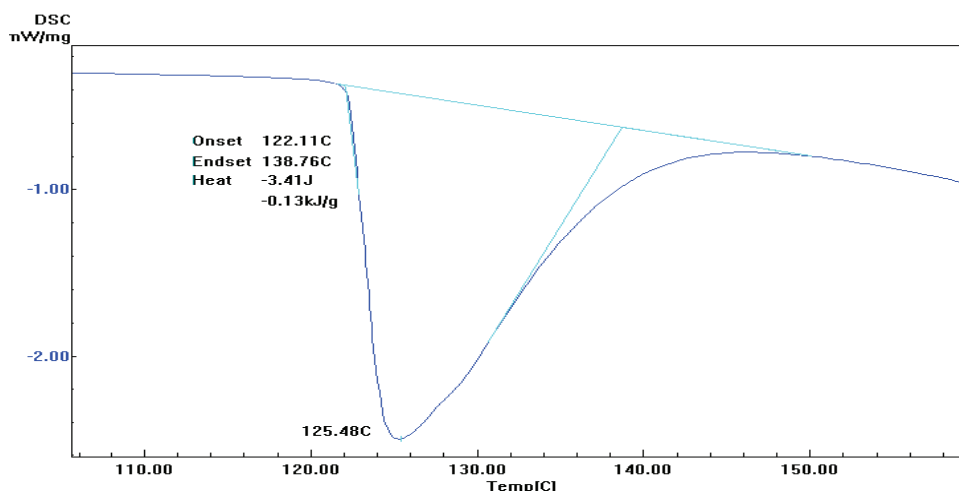


Figura AIV.16. Termograma del primer barrido de ácido benzoico (validación)

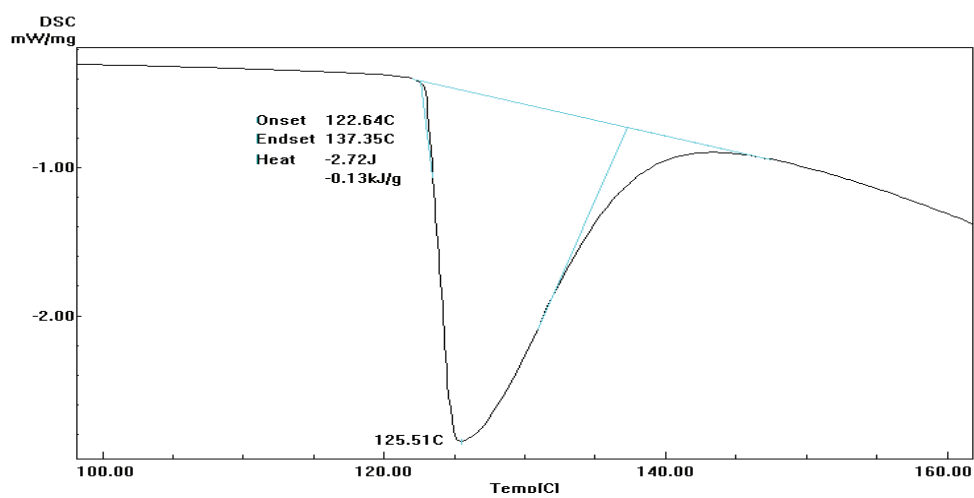


Figura AVI.17. Termograma del segundo barrido de ácido benzoico (validación)

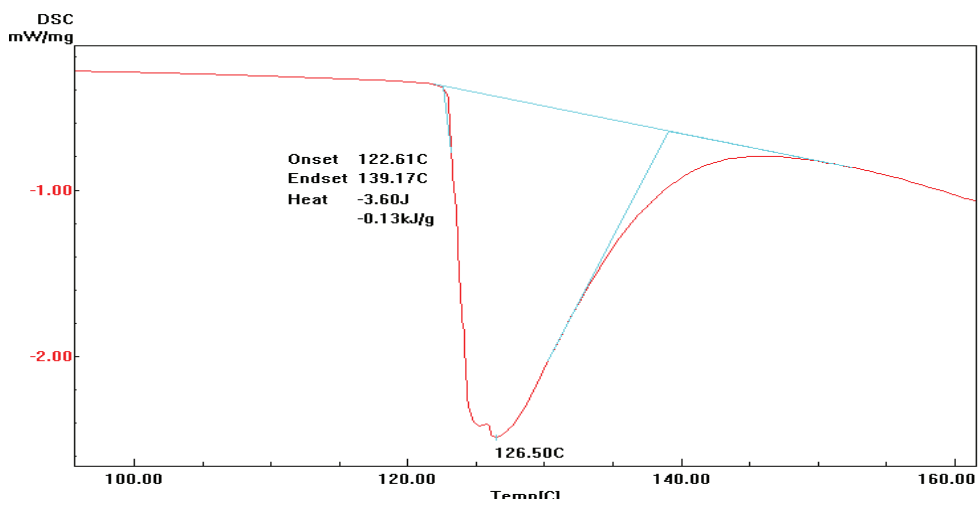


Figura AVI.18. Termograma del tercer barrido de ácido benzoico (validación)

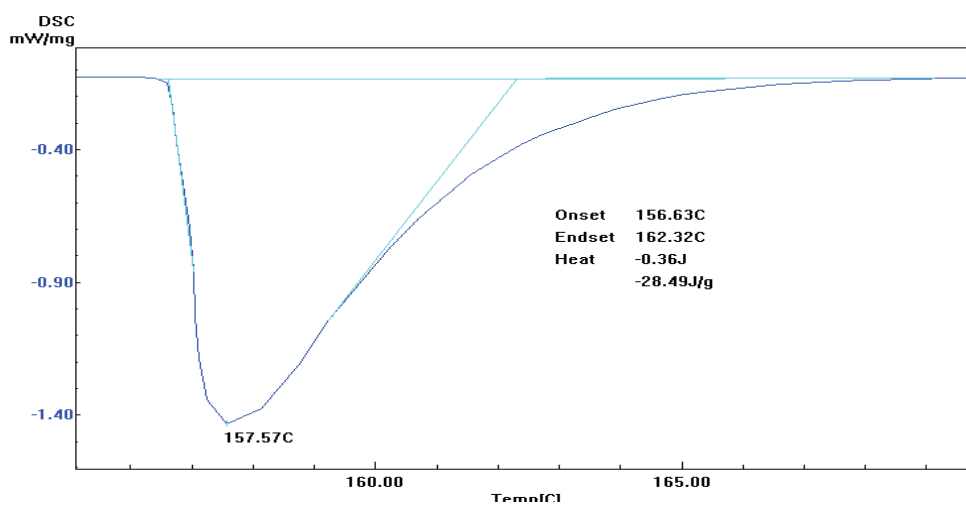


Figura AVI.19. Termograma del primer barrido de In (validación)

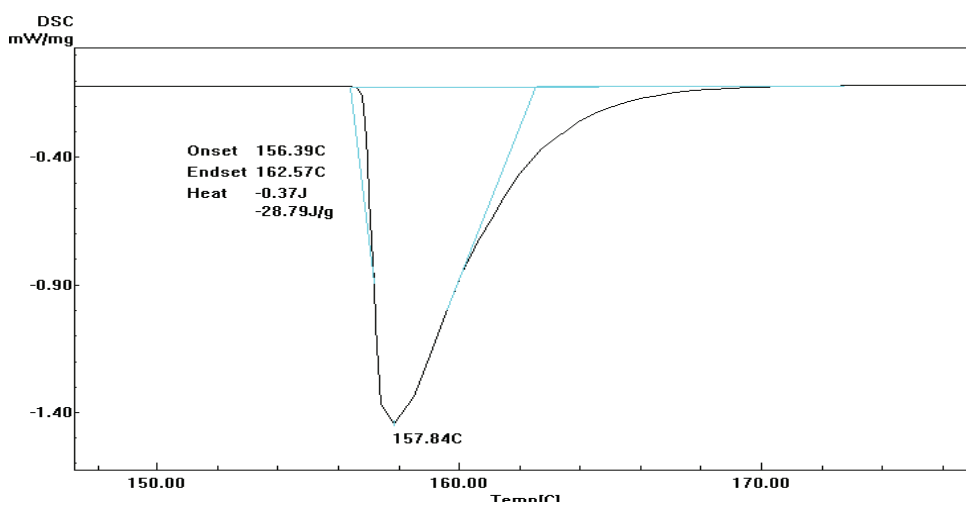


Figura AVI.20. Termograma del segundo barrido de In (validación)

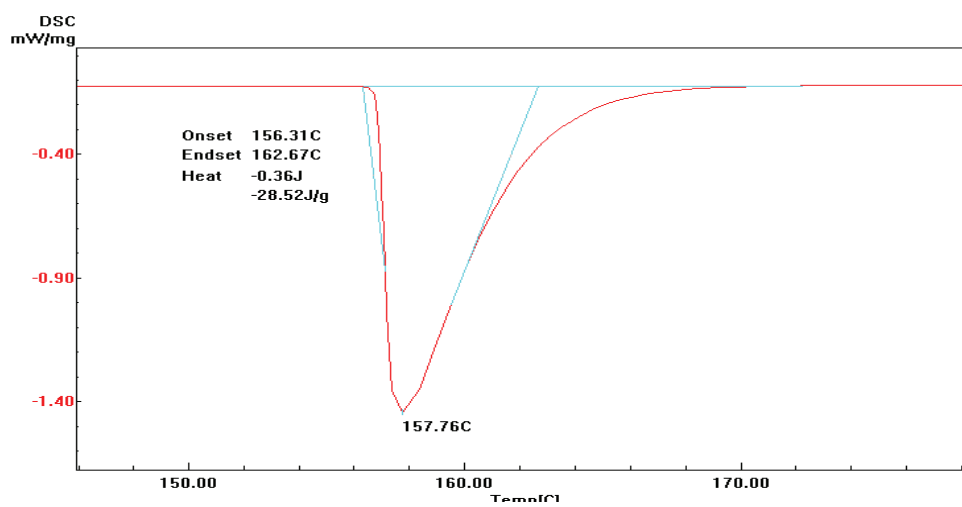


Figura AVI.21. Termograma del tercer barrido de In (validación)

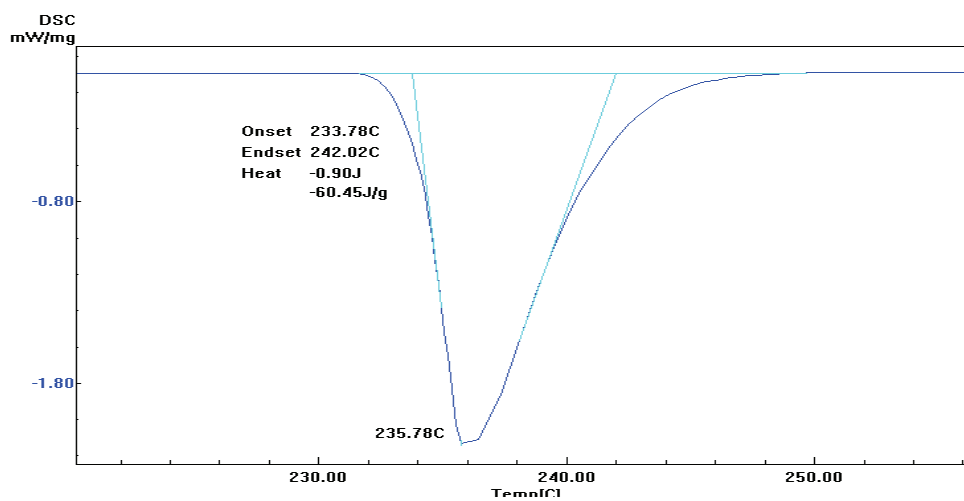


Figura AVI.22. Termograma del primer barrido de Sn (validación)

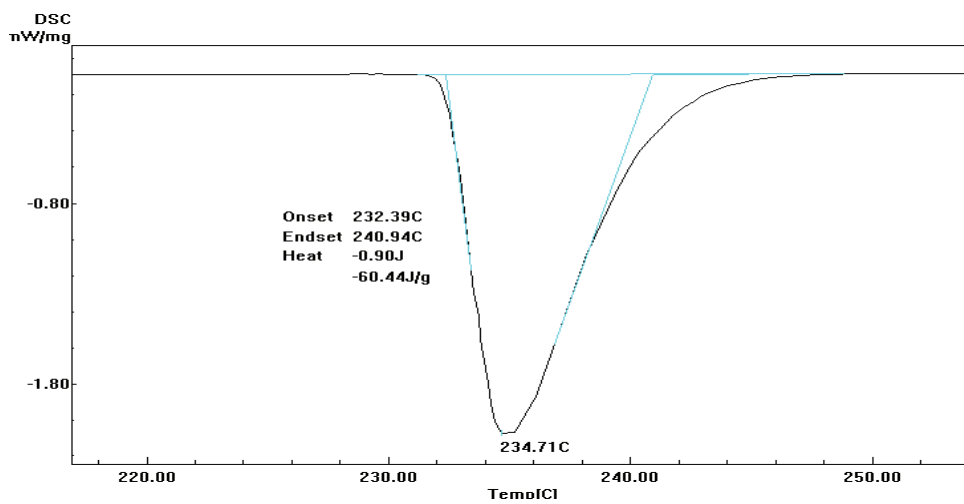


Figura AVI.23. Termograma del segundo barrido de Sn (validación)

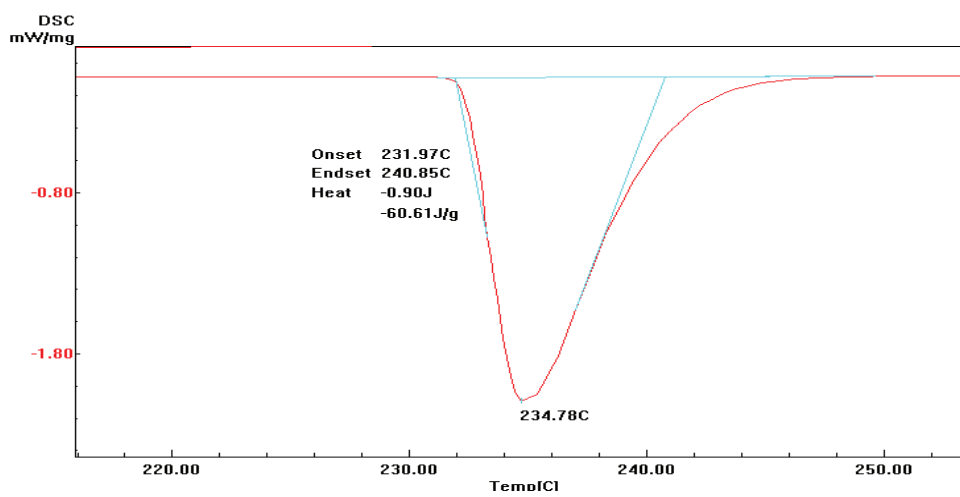


Figura AVI.24. Termograma del tercer barrido de Sn (validación)

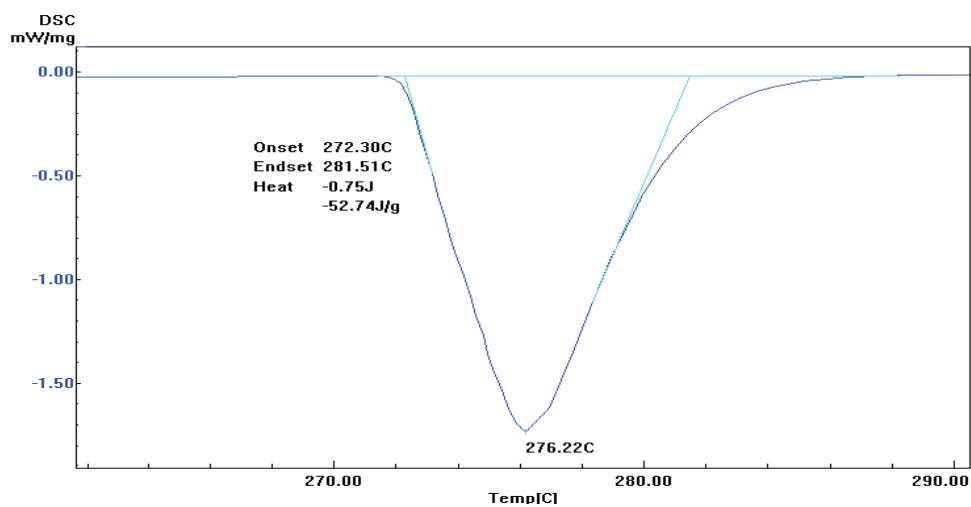


Figura AVI.25. Termograma del primer barrido de Bi (validación)

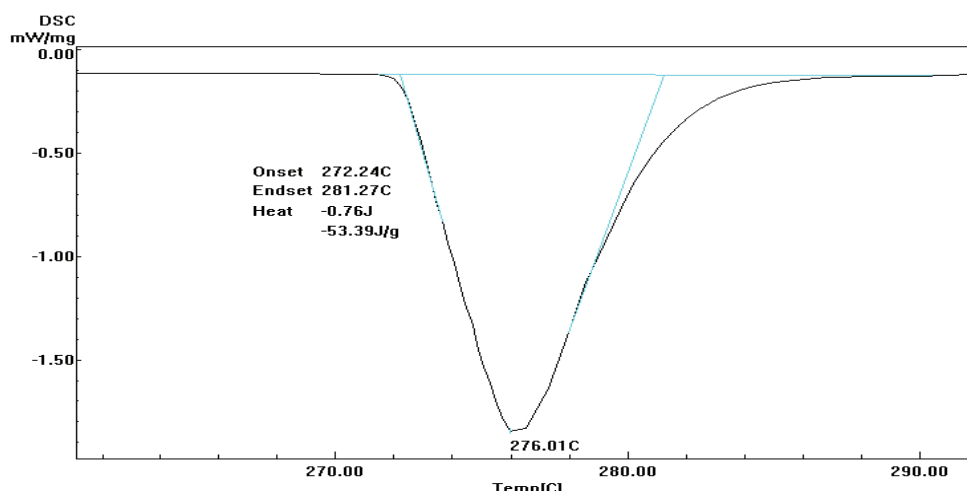


Figura AVI.26. Termograma del segundo barrido de Bi (validación)

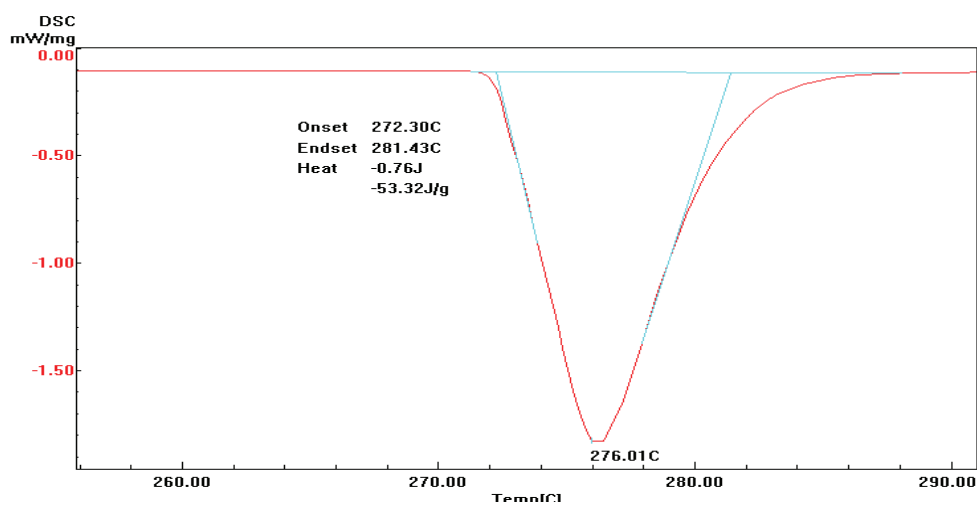


Figura AVI.27. Termograma del tercer barrido de Bi (validación)

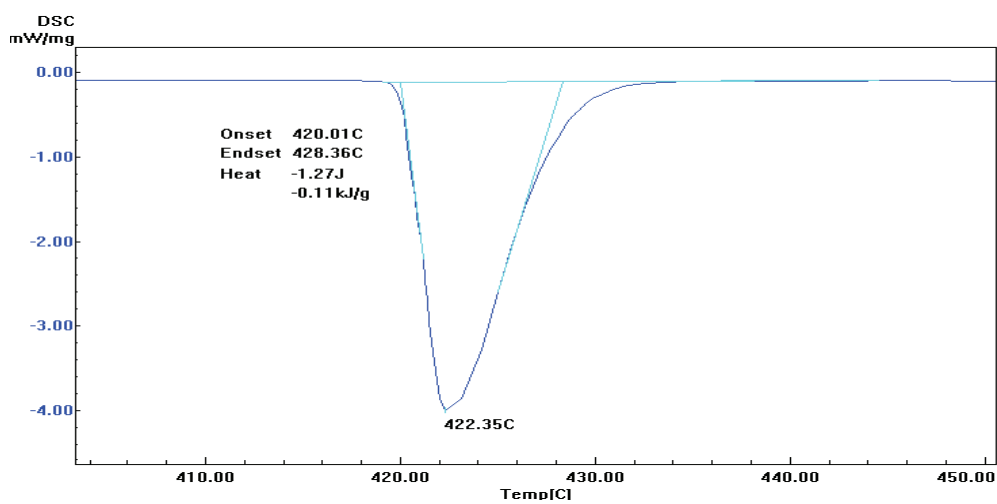


Figura AVI.28. Termograma del primer barrido de Zn (validación)

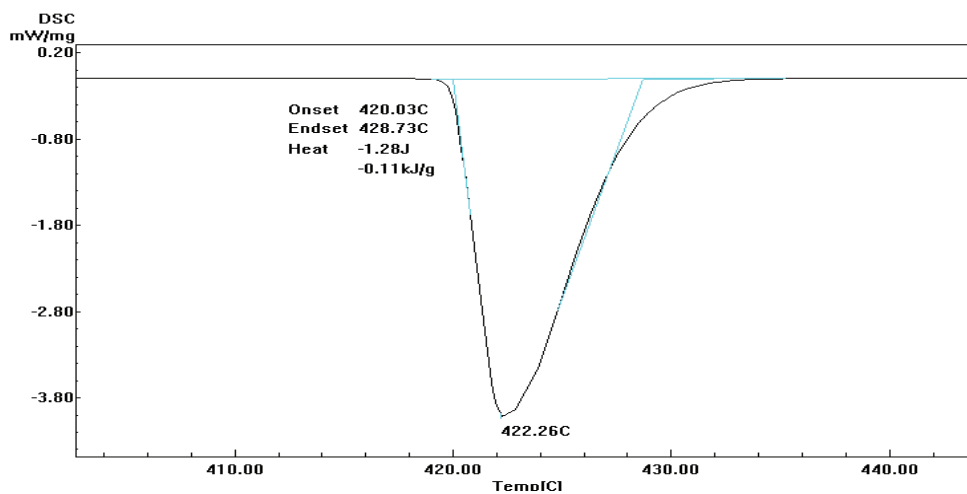


Figura AVI.29. Termograma del segundo barrido de Zn (validación)

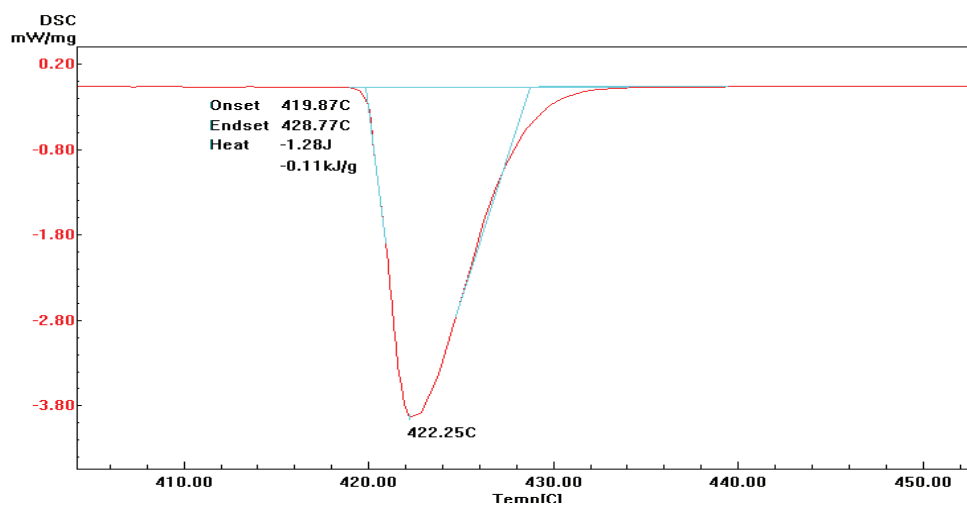


Figura AVI.30. Termograma del tercer barrido de Zn (validación)

ANEXO VII

PESOS DE LOS COMPONENTES INDIVIDUALES PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS EN LA CÁMARA DE MEZCLADO

En la Tabla AVII.1. se muestran los pesos de los componentes de las mezclas del sistema PETb / PBT calculados para un 70 % de la capacidad de la cámara de mezclado Haake.

Tabla AVII.1. Pesos calculados de los componentes individuales de las mezclas del sistema PETb / PBT

COMPONENTE 1		COMPONENTE 2		Densidad Mezcla (g/cm ³)	Peso Mezcla (g)	PESOS COMPONENTES (g)	
PBT		PETb				PBT	PETb
Densidad (g/cm ³)	Fracción en peso (w/w)	Densidad (g/cm ³)	Fracción en peso (w/w)				
1,38	0,05	1,38	0,95	1,38	66,62	3,33	63,29
	0,1		0,9	1,38	66,63	6,66	59,97
	0,2		0,8	1,38	66,64	13,33	53,32
	0,5		0,5	1,38	66,69	33,34	33,34
	0,8		0,2	1,38	66,73	53,39	13,35

En la Tabla AVII.2 se muestran los pesos de los componentes de las mezclas del sistema PETb / PET calculados para un 70 % de la capacidad de la cámara de mezclado Haake.

Tabla AVII.2. Pesos calculados de los componentes individuales de las mezclas del sistema PA6 / PETe

COMPONENTE 1		COMPONENTE 2		Densidad Mezcla (g/cm ³)	Peso Mezcla (g)	PESOS COMPONENTES (g)	
PA 6		PETe				Pa 6	PETe
Densidad (g/cm ³)	Fracción en peso (w/w)	Densidad (g/cm ³)	Fracción en peso (w/w)				
1,15	0,9	1,32	0,1	1,17	56,50	50,85	5,65
	0,8		0,2	1,19	57,32	45,85	11,46
	0,2		0,8	1,29	62,23	12,45	49,78
	0,1		0,9	1,31	63,05	6,30	56,74

El peso de la carga fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$W_m = \rho_m \times V_n \times F \quad [\text{AVII.1}]$$

Donde:

W_m = Peso de la carga en gramos

ρ_m = Densidad de la mezcla en g/cm³

V_n = Volumen neto de la cámara (69 cm³ con rotores Roller)

F = Factor de llenado de la cámara = 0,7

Para la determinación de la densidad de la mezcla se utilizó la siguiente fórmula:

$$\rho_m = x_i \times \rho_i + x_j \times \rho_j \quad [\text{AVII.2}]$$

Donde:

x_i = Fracción en peso del componente i

ρ_i = Densidad del componente i

x_j = Fracción en peso del componente j

ρ_j = Densidad del componente j

Ejemplo de cálculo:

Para el cálculo de los componentes de la mezcla PA6 / PETe (90 / 10) se determinó la densidad de mezcla introduciendo los valores de densidad de los componentes puros en la Ecuación [AVII.2]:

$$\rho_m = x_i \times \rho_i + x_j \times \rho_j$$

$$\rho_m = 0,90 \times 1,15 + 0,1 \times 1,32 = 1,17 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Con la densidad calculada de la mezcla y el volumen neto se obtuvo el peso de la carga para ocupar un 70 % de la capacidad de la cámara de mezclado por medio de la Ecuación [AVII.1]

$$W_m = 1,17 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 69 \text{ cm}^3 \times 0,7 = 56,50 \text{ g}$$

Para determinar el peso de los componentes, se multiplicó la carga total por la fracción en peso de cada uno de los componentes:

$$W_{PA6} = 56,50 \times 0,90 = 56,85 \text{ g}$$

$$W_{PETe} = 56,50 \times 0,10 = 5,65 \text{ g}$$

ANEXO VIII

BALANCES DE MASA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA 95 % PET – 5 % PBT CON MATERIALES COMERCIALES Y RECICLADOS

- **Cálculo de la cantidad de material que ingresa al secador**

Para determinar la cantidad de materia prima que debe ingresar al secador, se consideró que los poliésteres a ser procesados estuvieron en contacto con el aire ambiental a las condiciones de la ciudad de Quito (70 % HR y 15 °C) durante más de 24 horas y que han absorbido un 0,3 % de su peso de agua (Binsack, 1996, p. 73). Se tomó en cuenta también que, se dispondrá de un stock de dos días de material seco y que éste al salir del secador poseerá un contenido de humedad del 0,005 % y que por lo tanto se eliminará prácticamente toda el agua absorbida-

Masa de mezcla húmeda que ingresa al secador

$$= \frac{260 \text{ kg mezcla}}{\text{día}} + \left(\frac{0,3 \text{ kg agua}}{100 \text{ kg mezcla}} \times \frac{260 \text{ kg mezcla}}{\text{día}} \right) = \frac{261 \text{ kg mezcla húmeda}}{\text{día}}$$

$$\frac{261 \text{ kg mezcla húmeda}}{\text{día}} \times 2 \text{ días} = 522 \text{ kg mezcla húmeda}$$

Masa de materias primas húmedas que ingresan al secador

$$522 \text{ kg mezcla húmeda} \times \frac{95 \text{ kg PET húmedo}}{100 \text{ kg mezcla húmeda}} = 496 \text{ kg PET húmedo}$$

$$522 \text{ kg mezcla húmeda} \times \frac{5 \text{ kg PET húmedo}}{100 \text{ kg mezcla húmeda}} = 26 \text{ kg PET húmedo}$$

Cálculo de la cantidad de agua necesaria para el baño de enfriamiento

Dimensiones del baño de enfriamiento: Longitud: 2000 mm; Ancho: 400 mm

Profundidad: 500 mm

Volumen total = $2 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 0,4 \text{ m}^3$

El baño de enfriamiento estará lleno al 80 % de su capacidad

Agua necesaria: $0,4 \text{ m}^3 \times 0,8 = 0,32 \text{ m}^3 \text{ agua} \times \frac{1000 \text{ kg agua}}{1 \text{ m}^3 \text{ agua}} = \frac{320 \text{ kg agua}}{\text{día}}$

ANEXO IX

CÁLCULOS REALIZADOS PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS

- **Extrusora**

Revoluciones por minuto (RPM) del husillo

El cálculo del número de revoluciones por minuto del husillo se determinó con la Ecuación AIX.1 (Rosato y Rosato, 1998, p. 160):

$$R = 2.3 \times D^2 \times h \times g \times N \quad \text{[AIX.1]}$$

Donde:

R= Producción (lb/h)

D= Diámetro del husillo en pulgadas (in)

h= profundidad de la sección de dosificación (in)

g= gravedad específica de la resina fundida

N= revoluciones del husillo en RPM

$$R = 260 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{8 \text{ horas}} \times \frac{2,24 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 72,8 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$h = 0,06 \times D \text{ (Naranjo et al., 2001, p. 6)}$$

$$h = 0,06 \times (1,77 \text{ in}) = 0,106 \text{ in}$$

$$g = 1,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ (T=285 °C) (Matweb, 2011)}$$

Al reemplazar los valores en la Ecuación AIX.1:

$$N = \frac{R}{2,3 \times D^2 \times h \times g} = \frac{72,8 \frac{\text{lb}}{\text{h}}}{2,3 \times (1,77 \text{ in})^2 \times 0,106 \text{ in} \times 1,2} = 79 \text{ RPM}$$

El perfil de temperatura a ser usado en la extrusora con los materiales vírgenes está basado en los reportados por Naranjo et. al. (2001), y son los siguientes (pp. 85, 89).

Tabla AIX.1. Perfil de Temperaturas de la extrusora a ser usado con materiales vírgenes

ZONA	TEMPERATURA (°C)
Zona 1	260
Zona 2	255
Zona 3	250
Zona 4	250
Zona 5	250

Al considerar que los materiales reciclados son más susceptibles a sufrir degradación a altas temperaturas, el perfil de temperaturas a ser usado será el siguiente.

Tabla AIX.2. Perfil de Temperaturas de la extrusora a ser usado con materiales reciclados

ZONA	TEMPERATURA (°C)
Zona 1	240
Zona 2	230
Zona 3	230
Zona 4	220
Zona 5	220

- **Secador**

Debido a que en los catálogos disponibles, estos equipos se seleccionan de acuerdo al volumen a secarse, para el dimensionamiento del secador, se tomó en cuenta el volumen de resina húmeda necesaria para dos días de producción:

$$522 \text{ kg mezcla reciclada húmeda} \times \frac{95 \text{ kg PET reciclado húmedo}}{100 \text{ kg mezcla reciclada húmeda}} \times \frac{\text{m}^3 \text{PET reciclado húmedo}}{1270 \text{ kg PET reciclado húmedo}} \times$$

$$\frac{1000 \text{ litros PET reciclado húmedo}}{1 \text{ m}^3 \text{PET reciclado húmedo}} = 390,5 \text{ litros PET reciclado húmedo}$$

$$522 \text{ kg mezcla reciclada húmeda} \times \frac{5 \text{ kg PBT reciclado húmedo}}{100 \text{ kg mezcla reciclada húmeda}} * \times \frac{\text{m}^3 \text{ PBT reciclado húmedo}}{1460 \text{ kg PBT reciclado húmedo}} \times$$

$$\frac{1000 \text{ litros PBT reciclado húmedo}}{1 \text{m}^3 \text{ PBT reciclado húmedo}} = 17,9 \text{ litros PBT reciclado húmedo}$$

Volumen Total a secarse:

$$390,5 \text{ litros PET reciclado húmedo} + 17,9 \text{ litros PET reciclado húmedo} = 408,4 \text{ litros de mezcla húmeda}$$

Sobredimensionamiento 20 %

$$408,4 \text{ litros} \times 1,2 = 500 \text{ litros}$$

- **Silo de almacenamiento**

Para el dimensionamiento del silo de almacenamiento, se tomó en cuenta el volumen de resina seca necesaria para dos días de producción:

$$520 \text{ kg mezcla reciclada} \times \frac{95 \text{ kg PET reciclado}}{100 \text{ kg mezcla reciclada}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ PET reciclado}}{1270 \text{ kg PET reciclado}}$$

$$= 0,39 \text{ m}^3 \text{ PET reciclado}$$

$$520 \text{ kg mezcla reciclada} \times \frac{5 \text{ kg PBT reciclado}}{100 \text{ kg mezcla reciclada}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ PBT reciclado}}{1270 \text{ kg PBT reciclado}}$$

$$= 0,02 \text{ m}^3 \text{ PET reciclado}$$

Volumen Total seco:

$$0,39 \text{ m}^3 \text{ PET reciclado} + 0,02 \text{ m}^3 \text{ PET reciclado} = 0,41 \text{ m}^3 \text{ mezcla seca}$$

Sobredimensionamiento 20 %

$$0,41 \text{ m}^3 \times 1,2 = 0,5 \text{ m}^3$$

Según el Apéndice A de la norma API 650-1998, para el almacenamiento de sólidos el recipiente debe tener las siguientes características:

Cabeza: elipsoidal 2:1

Fondo: cónico

Carcasa: cilíndrica

Las dimensiones para cada una de las partes están determinadas en función de la altura de la carcasa cilíndrica H con las siguientes proporciones.

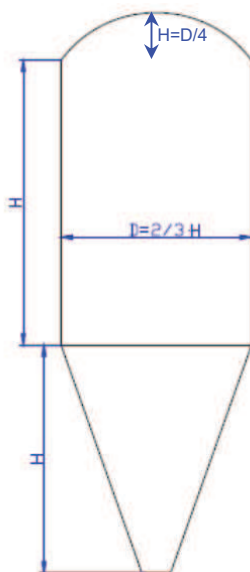


Figura AIX.1. Proporciones del silo de almacenamiento de sólidos según la norma API 650-1998

Para $H = h_{\text{cono}} = 1 \text{ m}$

Volumen del cilindro

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \times R^2 \times H \quad [\text{AIX.2}]$$

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \times \left(\frac{2 \times 1}{3}\right)^2 \times 1 = 0,35 \text{ m}^3$$

$D = 0,7 \text{ m}$

Volumen del cono

$$V_{\text{cono}} = \frac{1}{3} \times \pi \times R^2 \times h_{\text{cono}} \quad [\text{AIX.3}]$$

$$V_{\text{cono}} = \frac{1}{3} \times \pi \times \left(\frac{2 \times 1}{2}\right)^2 \times 1 = 0,1 \text{ m}^3$$

Volumen de la cabeza

$$V_{\text{cabeza}} = \frac{\left(\frac{1}{3} \times D^2 \times h_{\text{cabeza}}\right)}{6} \quad [\text{AIX.4}]$$

$$V_{\text{cabeza}} = \frac{\left(\frac{1}{3} \times D^2 \times \frac{D}{4}\right)}{6} = \frac{\left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{2 \times 1}{3}\right)^2 \times \frac{2 \times 1}{4}\right)}{6} = 0,04 \text{ m}^3$$

Espesor mínimo

$$e_{\text{cilindro}} = \frac{\gamma \cdot d \cdot r}{\sigma_t \cdot E_s} \quad [\text{AIX.5}]$$

Donde:

e = espesor mínimo del cilindro (cm)

γ = peso específico del producto almacenado, kg/cm³

d = nivel máximo de producto almacenado

r = radio del cilindro, cono y cabeza elipsoidal, cm

σ_t = tensión máxima admisible del material, kg/cm²

E_s = eficiencia de la soldadura

Reemplazando los valores para el acero inoxidable:

$$e_{\text{cilindro}} = \frac{1,38 \text{ E-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \cdot 81 \text{ cm} \cdot 33 \text{ cm}}{250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 0,6} = 0,02 \text{ cm}$$

ANEXO X

HOJAS DE ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS

En la Figura AX.1 se muestra la hoja de especificación del premezclador:

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 1	
Identificación	Fabricante: Adler Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	PREMEZCLADOR modelo : AT-60
Función	Premezclar los materiales antes de ingresar al secador
Operación	Por Cargas
Datos de Diseño	Dimensiones: Base: 1250*1250 mm Altura: 2700*2700 mm
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Principio de operación	Mediante las aspas mezcladoras, los materiales que ingresan a la cámara se mezclan de forma homogénea
Esquema	

Figura AX.1. Hoja de Especificación del premezclador

En la Figura AX2 se muestra la hoja de especificación del deshumidificador.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 2	
Identificación	Fabricante: Piovan Numero requerido: 2
Nombre del Equipo	DESHUMIDIFICADOR modelo : DP620 HT
Función	Generar aire seco para el material de la tolva
Operación	Por Cargas
Datos de Diseño	Dimensiones: Altura: 1930 mm Ancho: 1090 mm Largo: 700 mm Potencia : 23,5 KW Temperatura de Proceso Max.: 200 °C Punto de Rocío Max.: -50°C Peso: 300 Kg
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Principio de operación	El Equipo posee con dos bombas de canales laterales, una para proporcionar aire seco para el ciclo de proceso y otra para el circuito de regeneración. El flujo de aire húmedo pasa a través de un serpentín frío, lo cual provoca que condense la humedad y caiga hacia un depósito inferior. El aire pasa posteriormente por un segundo serpentín donde ganará un poco de temperatura para así suministrarlo ligeramente tibio a la tolva de secado.
Esquema	

Figura AX.2. Hoja de Especificación del deshumidificador

En la Figura AX.3 se muestra la hoja de especificación de la tolva cristalizadora.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 3	
Identificación	Fabricante: Conair Numero requerido: 2
Nombre del Equipo	TOLVA CRISTALIZADORA modelo : CR500
Función	Secar los materiales a ser procesados
Operación	Por Cargas
Datos de Diseño	Dimensiones: Altura total: 4889,5 mm Ancho total: 1752,6 mm Profundidad: 1780,5 mm Peso: 1504 Kg
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Principio de operación	El aire seco y calentado ingresa por el cono difusor en la parte inferior del silo, arrastrando la humedad de la superficie de los gránulos de resina. El aire húmedo sale por la parte superior del silo, pasa por un filtro para eliminar partículas finas de resina que podrían dañar el material adsorbente del tamiz molecular. La temperatura del aire proveniente del silo es disminuida mediante un intercambiador de calor para optimizar la adsorción de humedad del aire por parte del tamiz molecular.
Esquema	

Figura AX.3. Hoja de especificación de la tolva cristalizadora

En la Figura AX.4 se muestra la hoja de especificación de la tolva cristalizadora.

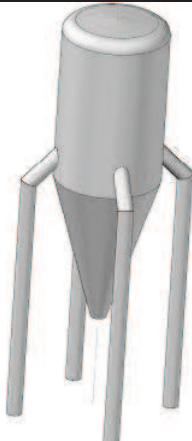
HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 4	
Identificación	Fabricante: Sematec Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	SILO DE ALMACENAMIENTO
Función	Almacenar los materiales a ser procesados
Operación	Por cargas
Datos de Diseño	Dimensiones: Cabeza: elipsoidal H: 0,2 m Carcasa: cilíndrica R: 0,35 m H: 1m Fondo: cónico R2: 0,05 m Hc: 1m Espesor máximo: 0,005 m
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Esquema	

Figura AX.4. Hoja de especificación del silo de almacenamiento

En la Figura AX.5 se muestra la hoja de especificación de la extrusora monohusillo.


HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 5	
Identificación	Fabricante: Dr. Collin Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	EXTRUSORA MONOHUSILLO Modelo: E 45 P
Función	Mezclar las resinas plásticas en estado fundido
Operación	Continuo
Datos de Diseño	Dimensiones: Tornillo de 5 zonas de calentamiento (ventilado) Largo: 1950 mm Ancho: 900 mm Altura: 1700 mm L/D: 30 D: 45 mm Producción máxima: 60 kg/h Temperatura de trabajo máxima: 350 °C Potencia: 27 kW Velocidad de rotación del husillo: 140 – 240 RPM Zonas de calentamiento del cilindro: 5 Enfriamiento: agua Consumo de agua: 20 L/min aproximadamente Peso: 700 kg Boquilla intercambiable para una selección del ancho de hebra entre 1 y 8 mm
Material de fabricación	Tolva: Acero Inoxidable Cilindro: Acero nitrurado
Principio de operación	La extrusora tiene tres funciones: en primer lugar, extrae el material en gránulos del sistema de alimentación y lo conduce al tiempo que lo comprime y desgasifica; en segundo lugar, mezcla y produce un fundido homogéneo, y, en tercer lugar, desarrolla la presión suficiente para que supere la resistencia al flujo de la hilera abierta, de modo que el perfil emerja de la hilera de forma continua.
Esquema	

Figura AX.5. Hoja de especificación del silo de almacenamiento

En la Figura AX.6 se muestra la hoja de especificación del baño de enfriamiento.

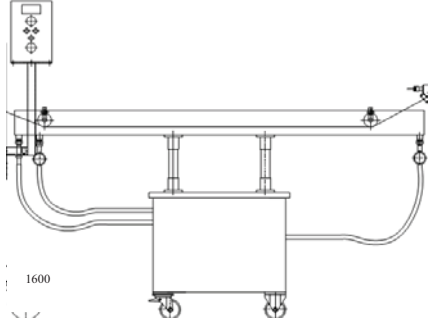
HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 6	
Identificación	Fabricante: Dr. Collin Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	BAÑO DE ENFRIAMIENTO Modelo: 850 T
Función	Enfriar el extruido
Operación	Continuo
Datos de Diseño	Dimensiones: Longitud: 2000 mm Ancho: 400 mm Profundidad: 500 mm Posee un intercambiador de calor integrado a la base del baño de agua, el cual tiene una bomba que permite la circulación de agua Potencia: 1 Kw
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Esquema	

Figura AX.6. Hoja de especificación del baño de enfriamiento

En la Figura AX.7 se muestra la hoja de especificación del pelletizador:

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 7	
Identificación	Fabricante: Dr. Collin Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	PELLETIZADOR Modelo: CSG 174
Función	Pelletizar las hebras de extruido
Operación	Continuo
Datos de Diseño	Dimensiones: Longitud: 895 mm Ancho: 690 mm Alto: 1800 mm Potencia: 2,2 kW Máximo número de hebras: 10 Tamaño de los pellets: 3 mm diam. x 3 mm Capacidad máxima: 150 kg/h Posee un par de rodillos para transporte (uno de acero inoxidable y otro cubierto de caucho). Tiene una pieza guía, una cuchilla estacionaria y un rotor peletizador. Tiene incorporado un soplador de aire para la remoción de agua
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Principio de Operación	El accionamiento de la unidad es proporcionado por un motor trifásico de frecuencia regulable de tres velocidades de despegue de hasta 20 m / min, el cual asegura un corte perfecto de la hilera
Esquema	

Figura AX.7. Hoja de especificación del pelletizador

En la Figura AX.8 se muestra la hoja de especificación de la ensacadora.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 8	
Identificación	Fabricante: Ecuapack Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	ENSACADORA Modelo: EAG-20
Función	Peletizar las hebras de extruido
Operación	Continuo
Datos de Diseño	Dimensiones: Longitud: 790 mm Ancho: 600 mm Alto: 1780 mm Potencia: 1300 W Capacidad: 20-60 bolsas por minuto Peso: 350 kg Consta de un recipiente para colocar el material a ser ensacado y un tornillo alimentador que transporta el grano hasta la parte superior del cilindro
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Principio de Operación	El dosificador de tornillo usa un servomotor controlado mediante PLC para rotar un tornillo sinfín que fuerza al producto bajar hasta el fondo del cilindro. El llenado de alta precisión se alcanza ajustando electrónicamente el número y el radio de giro del tornillo sinfín. Un robusto motor de agitación (controlado por PLC) homogeniza el producto y rompe las aglomeraciones que se puedan formar, forzando al producto a llegar al cilindro del tornillo para ser dosificado.
Esquema	

Figura AX.8. Hoja de especificación de la ensacadora

En la Figura AX.9 se muestra la hoja de especificación de la bomba al vacío.


HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 9	
Identificación	Fabricante: Edwards Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	BOMBA AL VACÍO TIPO ANILLO DE AGUA Modelo: 2BE4
Función	Succionar los gases y vapores provenientes del material que está siendo extruido
Operación	Continuo
Datos de Diseño	Motor: 0,5 kW Consumo de agua: 0,2 m ³ /h Presión Absoluta: 150 mbar Rapidez de succión: 6 m ³ /h Posee un anillo para sellar el eje
Material de fabricación	Acero Inoxidable Rueda de turbina: latón
Esquema	

Figura AX.9. Hoja de especificación de la bomba al vacío

En la Figura AX.10 se muestra la hoja de especificación del sistema de alimentación.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 10	
Identificación	Fabricante: Edwards Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Modelo: Control Easy3
Función	Manejar el transporte del material por la línea de producción
Operación	Continuo
Datos de Diseño	<p>Incluye lo siguiente:</p> <p>Panel de control central Easy3</p> <p>Una alarma centralizada visual y acústica</p> <p>Conexiones en serie entre el panel de control y los recibidores de las bombas</p> <p>Un kit de cables seriales para la conexión del control Easy3 con las bombas y los recibidores de bombas</p> <p>Sistema de alimentación de silo</p> <p>Incluye las siguientes unidades:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Unidad de bombeo F44/2 para la carga automática de los gránulos plásticos. Está equipado con: <ul style="list-style-type: none"> - Soplador 4,6 kW, 360 V / 60 Hz - Filtro de ciclón - Soporte único para la bomba al vacío y el filtro - Limpieza automática de los cartuchos de aire comprimido 2) Un recibidor Easy3 modelo C30 S38-M ubicado encima del silo de almacenamiento, con las siguientes características <ul style="list-style-type: none"> - 30 L de capacidad - Construcción en acero inoxidable - Construcción especial de cono de 38 ° - Diámetro de descarga: 140 mm 3) Un set de ensamblaje de partes <p>Sistema de alimentación a la extrusora</p> <p>Incluye las siguientes unidades:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Un recibidor Easy3 modelo C30 S38-M ubicado encima del silo de almacenamiento, con las siguientes características <ul style="list-style-type: none"> - 30 L de capacidad - Construcción en acero inoxidable - Construcción especial de cono de 38 ° - Diámetro de descarga: 140 mm 2) Una tolva de acero inoxidable T50M para ser instalada en la alimentación de la extrusora 3) Un set de ensamblaje de partes

Figura AX.10. Hoja de especificación del sistema de alimentación

En la Figura AX.11 se muestra la hoja de especificación de la báscula digital.

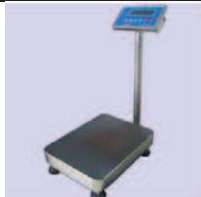

HOJA DE ESPECIFICACIÓN Nro. 11	
Identificación	Fabricante: Tedeo Numero requerido: 1
Nombre del Equipo	BASCULA DIGITAL Modelo: Lexus TEEL-W-SS-150
Función	Determinar el peso de cada componente en la mezcla a ser procesada
Operación	Por cargas
Datos de Diseño	Capacidad: 150 kg División: 20 g Unidades: kg / lb Alimentación: 110 VAC, adaptador: AC/DC 6 V/500 mA Display: Tipo Led Tara: Sustractiva hasta el 100 % Dimensiones del Plato: 45 x 60 cm
Material de fabricación	Acero Inoxidable
Esquema	

Figura AX.11. Hoja de especificación de la báscula digital

ANEXO XI

COTIZACIONES DE LOS EQUIPOS SELECCIONADOS Y MATERIAS PRIMAS

En la Figura AXI se muestra la cotización de la línea de extrusión completa.



Fecha: 31/01/2013 Cotización No.: 017-NT-2013-Rev1
 Cliente: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL (EPN) Moneda: US Dollar
 Atención: Gabriela Mijas Validez Oferta: 30 días
 Fax: Tiempo de Entrega: 250 días

Item	Cant.	No. Catálogo	Descripción	P. Unit	P. Total
1	1	4.1	EXTRUSORA E 45 P	130.432,00	130.432,00
		Proveedor: DR. COLLIN	Extrusora con tornillo de 45 mm de diámetro x 30 D de acero nitrurado. La extrusora E 45 P está accionada por un motor compacto con control de frecuencia. Incluye contenedor con zona de alimentación enfriada con agua, silo con pestaña para cerrado y contenedor de material con cubierta de acero nitrurado.		
1,1	1	4.10.2_1	Zona de alimentación con aberturas. La zona de alimentación con aberturas permite la alimentación de polímeros con diferente granulometría y forma.	6.237,00	6.237,00
		Proveedor: DR. COLLIN			
1,1	1	4.9	Tornillo de 5 zonas 30 D (ventilado). Material: Acero nitrurado.	11.635,00	11.635,00
		Proveedor: DR. COLLIN			
1,1	1	4.9.3	Abertura de ventilación en el cilindro con enchufe y puerto de ventilación	5.251,00	5.251,00
		Proveedor: DR. COLLIN			
1,1	1	6.1.1	Control de temperatura adicional para regular la temperatura del adaptador y del molde	1.113,00	1.113,00
		Proveedor: DR. COLLIN			
1,1	1	6.5.2.1	Medición de la temperatura de fundición con termocupla (FeCuNi):	3.130,00	3.130,00
		Proveedor: DR. COLLIN	- Balanceo de línea - Amplificador de medición - Display digital		
1,1	1	6.5.3.2	Medición de la presión de fundición que consiste en:	4.936,00	4.936,00
		Proveedor: DR. COLLIN	- Medidor eléctrico de la presión de membrana. - Cable conector, amplificador y display digital. - Límite ajustable para exceso de presión - Rango de medición: 0 - 600 bar		
1,1	1	7.2.1.3	Molde alargado con un diseño angular de 45° para extruir hacia abajo:	5.565,00	5.565,00
		Proveedor: DR. COLLIN	Incluye boquilla intercambiable para una selección del ancho		

Quito: Psje. Fray Joaquín Auz E7-08 y Últimas Noticias, Quito. Telf. 244 2388
 Guayaquil: Miguel Campodónico No. 705 y Luis Orrantía, Edificio Park Avenue, 2do. Piso. Telf. 600 1488

1 de 6

Figura AXI.1. Cotización de la línea completa de extrusión



Fecha: 31/01/2013
 Cliente: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL (EPN)
 Atención: Gabriela Mijas
 Fax:

Cotización No.: 017-NT-2013-Rev1
 Moneda: US Dollar
 Validez Oferta: 30 días
 Tiempo de Entrega: 250 días

Item	Cant.	No. Catálogo	Descripción	P. Unit	P. Total
			de hebra entre 1 y 8 mm		
2	1	6.9.3.1 Proveedor: DR. COLLIN	Software VISUAL FECON para 1 máquina El software VISUAL FECON permite la adquisición de datos y la evaluación del sistema. Necesita un sistema Windows XP/7. Además, puede realizar gráficos de líneas reales e históricos y permite el almacenamiento de programas con valores fijos y protocolos con valores reales. Incluye grabación de cambios hechos y protocolo de error y falla.	13.714,00	Opcional
3	1	7.7 Proveedor: DR. COLLIN	<u>Bomba al vacío tipo anillo de agua</u> Bomba de anillo de agua con tubos de acero al vacío conectados a la zona de ventilación. Tiene un motor de 0,5 kW con anillo para sellar el eje. Además, el material de la rueda de la turbina es latón. Consumo de agua: 0,2 m ³ /h. Presión absoluta: 150 mbar. Rapidez de succión: 6 m ³ /h o máxima.	16.549,00	16.549,00
4	1	8.1.3 Proveedor: DR. COLLIN	<u>Unidad de Peletizado</u> Peletizador de hebra tipo CSG 174. Unidad peletizadora con un par de rodillos para transporte (uno de acero inoxidable y otro cubierto de caucho). Tiene una pieza guía, una cuchilla estacionaria opuesta y un rotor peletizador. Su cubierta rígida garantiza una excelente desempeño del rotor peletizador. Características: - Conducido por un motor trifásico con velocidad variable desde 12-60 m/min. - Potencia del motor: 2,2 kW - Máximo número de hebras: 10. - Tamaño de los pellets: 3 mm diam x 3 mm - Capacidad máxima: 150 kg/h	51.723,00	51.723,00

Quito: Psje. Fray Joaquín Auz E7-08 y Últimas Noticias, Quito. Telf: 244 2388

Guayaquil: Miguel Campodonico No. 705 y Luis Orrantía, Edificio Park Avenue, 2do. Piso. Telf: 600 1486

2 de 6

Figura AXI.1. Cotización de la línea completa de extrusión (continuación...)



Fecha: 31/01/2013 Cotización No.: 017-NT-2013-Rev1
 Cliente: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL (EPN) Moneda: US Dollar
 Atención: Gabriela Mijas Validez Oferta: 30 días
 Fax: Tiempo de Entrega: 250 días

Item	Cant.	No. Catálogo	Descripción	P. Unit	P. Total
5	1	8.1.4.3 Proveedor: DR. COLLIN	Baño de agua longitud 2000 mm	9.556,00	9.556,00
6	1	8.1.8.1 Proveedor: DR. COLLIN	Soplador de aire para la remoción de agua	4.893,00	4.893,00
7	1	8.1.8.3 Proveedor: DR. COLLIN	Intercambiador de calor instalado en el baño de agua. El intercambiador de calor está integrado a la base del baño de agua. Tiene una bomba integrada que permite la circulación de agua. Conexión eléctrica: 1 kW	5.440,00	5.440,00
8	1	9.9 Proveedor: DR. COLLIN	Máquina granuladora MSD 120/150 Granuladora de plástico compacta y estable, enmarcada en 4 ruedas, 2 de las cuales tienen un artefacto de fijación. La máquina viene lista para conectar con 5 metros de cable. Características: Ancho de trabajo: 119 mm Abertura del área de molienda: 120 x 180 mm Potencia del motor: 2,2 kW Alimentación: 3 x 400 V, 50 Hz Velocidad del rotor: 280 1/min Número de cuchillas del rotor: 3 Número de cuchillas del estator: 2	16.002,00	16.002,00
9	1	9.9.1 Proveedor: DR. COLLIN	Sistema de alimentación Control Easy3 Un sistema de control Easy3 para manejar el transporte del material por la línea de producción. Incluye lo siguiente: - Un panel de control central Easy3. - Una alarma centralizada visual y acústica. - Conexiones en serie entre el panel de control y los receptores de las bombas. - Un kit de cables seriales para la conexión del control Easy3 con las bombas y los receptores de bombas.	41.286,00	41.286,00

Quito: Psje. Fray Joaquín Auz E7-08 y Últimas Noticias, Quito. Telf: 244 2388
 Guayaquil: Miguel Campodónico No. 705 y Luis Orrantía, Edificio Park Avenue, 2do. Piso. Telf: 600 1486

3 de 6

Figura AXI.1. Cotización de la línea completa de extrusión (continuación...)



Fecha: 31/01/2013
 Cliente: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL (EPN)
 Atención: Gabriela Mijas
 Fax:

Cotización No.: 017-NT-2013-Rev1
 Moneda: US Dollar
 Validez Oferta: 30 días
 Tiempo de Entrega: 250 días

Item	Cant.	No. Catálogo	Descripción	P. Unit	P. Total
Sistema de alimentación CR500					
Incluye las siguientes unidades:					
1. Una unidad de bombeo F44/2 para la carga automática de gránulos plásticos. Esta equipado con: <ul style="list-style-type: none"> - Soplador 4.6 kW, 340 V/ 60 Hz. - Filtro de ciclón. - Soporte único para la bomba al vacío y el filtro. - Limpieza automática de los cartuchos con aire comprimido. 					
2. Una recibidor Easy3 modelo C30 S38-M, para el material molido ubicado encima del CR500 con las siguientes características: <ul style="list-style-type: none"> - Construcción de acero inoxidable. - Construcción especial de cono de 38° - Diámetro de descarga: 140 mm 					
3. Un set de ensamblaje de partes.					
Sistema de alimentación a la extrusora					
Consiste en los siguientes sistemas:					
1. Un recibidor Easy3 modelo C30 S38-M para el material molido ubicado encima de CR500					
2. Una tolva de acero inoxidable T50M para ser instalado en la alimentación de la extrusora.					
3. Un set de ensamblaje de partes.					
10	2	9.9.2	Sistemas de dehumidificación y Secado	193.411,00	193.411,00
		Proveedor: DR. COLLIN	- Un equipo de dehumidificación - secado modelo DP620 HT que genera aire seco para el material de la tolva.		
			- Una tolva cristalizadora CR500 de acero inoxidable de capacidad de 500 L de llenado.		
11	2	Empaque línea.	Empaque línea completa	6.301,00	6.301,00
		Proveedor: DR. COLLIN			

Quito: Psje. Fray Joaquín Auz E7-08 y Últimas Noticias, Quito. Telf: 244 2388

Guayaquil: Miguel Campodonico No. 705 y Luis Orrantía, Edificio Park Avenue, 2do. Piso. Telf: 600 1486

4 de 6

Figura AXI.1. Cotización de la línea completa de extrusión (continuación...)



Fecha: 31/01/2013 Cotización No.: 017-NT-2013-Rev1
 Cliente: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL (EPN) Moneda: US Dollar
 Atención: Gabriela Mijas Validez Oferta: 30 días
 Fax: Tiempo de Entrega: 250 días

Item	Cant.	No. Catálogo	Descripción	P. Unit	P. Total
12	1	Instalación Proveedor: DR. COLLIN	Costo de la instalación, puesta en marcha y capacitación en sitio por 5 días.	19.320,00	19.320,00

Moneda:	US Dollar	Subtotal:	532.780,00
Son:	Quinientos noventa y seis mil setecientos trece dólares con sesenta centavos con IVA	Descuento: 0 %	0,00
Forma de Pago:	El Pago será acordado y confirmado por escrito.	Total Sin IVA:	532.780,00
		Tarifa IVA: 12 %	532.780,00
		Tarifa IVA: 0 %	0,00
		IVA:	63.933,60
		Total Con IVA:	596.713,60

Ítems Incluidos: vienen con el equipo sin costo adicional.

Ítems Opcionales: no están incluidos en el precio total y en caso de querer incluirlos se debe añadir el precio total para ese ítem y el IVA de ese ítem.

Código RUP sugerido:

PARA CUALQUIER COMUNICACIÓN Y EN CASO DE ADJUDICACIÓN CON RESPECTO A ESTA OFERTA, POR FAVOR REFERIRSE AL NÚMERO DE COTIZACIÓN 017-NT-2013-Rev1.

Atentamente,
 NATHALIE DE LA TORRE
 Oficinas Jose Jalil

ALCANCE DE LOS SERVICIOS INCLUIDOS EN NUESTRA OFERTA

AL ACEPTAR ESTA COTIZACIÓN SE CONFIRMA EL HABER LEÍDO Y ACEPTADO LAS CARACTERÍSTICAS AQUÍ DESCRITAS

1.- Toda la mercadería adquirida a JOSÉ JALIL, goza de una garantía técnica que, por lo general, se encuentra manifestada en la oferta o en un documento al realizar la entrega de la mercadería. Esta garantía puede ser: uno o dos años de mano de obra, dependiendo de la mercadería entregada. El primer año de garantía cubre la provisión de repuestos, partes o piezas (no consumibles) que muestren fallas de operación debido a malos materiales de construcción y/o a fallas de diseño, técnica y debidamente comprobadas. Los equipos de computación y la vidriera tienen una garantía de seis meses, salvo un acuerdo específico.

2.- Toda mercadería provista por las oficinas de JOSÉ JALIL, se entregará instalada, puesta en marcha y se dará la capacitación que consiste en una demostración de las características y la operación del equipo, de acuerdo a lo recomendado por el fabricante.

La instalación del equipo se refiere a la actividad de colocar el equipo en el sitio asignado para el mismo, la conexión a los servicios que requiere el equipo (electricidad apropiada, agua, gas, aire, etc., según lo requiera el equipo) y que deben estar disponibles en el sitio en la cantidad y las características apropiadas para el equipo. La puesta en marcha es la actividad de poner en funcionamiento el equipo y comprobar las funciones del mismo de acuerdo a lo recomendado por el fabricante. Los datos que ofrezca el equipo se compararán e interpretarán únicamente de acuerdo a lo especificado por el fabricante del equipo en cuanto a capacidades, valores, límites, incertidumbres, tiempos de respuesta, exactitudes, etc. Para esto se recurrirá a los catálogos y manuales. Cualquier análisis fuera de lo recomendado por el fabricante o que no conste en los catálogos o manuales, no podrá ser utilizado para comparación o interpretación de datos, salvo consulta al fabricante y aceptación del mismo. Los procedimientos de medición o de aceptación de equipos serán acordes a lo establecido por el fabricante. Las características técnicas serán las sostenidas por el fabricante y en caso de duda será el fabricante quien defina el cumplimiento del equipo o no.

La capacitación dictada por el personal de las oficinas de JOSÉ JALIL, no contempla el dictado de cursos teóricos sobre los principios de funcionamiento ni sobre las técnicas utilizadas para el análisis o manejo de datos. El personal del cliente deberá tener los conocimientos necesarios y suficientes de la teoría básica y de la técnica analítica correspondiente, del principio de funcionamiento de los equipos, así como el conocimiento de la interpretación necesaria de los datos obtenidos, siendo este un requisito para recibir la capacitación deseada. Si la oferta contemplare cursos específicos de la teoría básica y de la técnica analítica correspondiente, del principio de funcionamiento de los equipos, así como el conocimiento de la interpretación necesaria de los datos obtenidos, entonces la responsabilidad es de nuestras oficinas. Esta necesidad debe estar claramente expresada en la solicitud de oferta y en nuestra oferta.

3.- La garantía técnica ofertada por JOSÉ JALIL, cubre daños debidos a malos materiales de fabricación y/o a fallas de diseño, debida y técnicamente comprobados. Esta garantía cubre mano

Quito: Psje. Fray Joaquín Auz E7-08 y Últimas Noticias, Quito. Telf: 244 2388

Guayaquil: Miguel Campodónico No. 705 y Luis Orrantía, Edificio Park Avenue, 2do. Piso. Telf: 600 1486

5 de 6

Figura AXI.1. Cotización de la línea completa de extrusión (continuación...)

En la Figura AXI.2 se muestra la cotización de la báscula digital.

[Quiénes somos y como comprar](#) | [Ver mi pedido](#) | [Inicio](#)

Contáctenos

 Quito: (2) 395 95 49
 (2) 332 58 42
 098-727 67 32

 comercio@viaindustrial.com.ec

 [Contáctenos por Skype](#)

 [Contáctenos por MSN](#)



[Catalogo de productos](#)

Cotización

Vigencia 15 días

Fecha: 09/04/2013

Empresa: Gabriela Mijas

Aten: 0998387946

Teléfono: 0998387946

E-mail: gabydaymv@hotmail.com

No. 8067



Comprar

Verifique el contenido de su cotización, las características de los productos, borre o agregue mas productos y ordene su pedido presionando el botón [Comprar](#) o [contáctenos](#)

Imagen	Código / Ref	Descripción	Cant.	Precio / Unitario	Precio / Total	Borrar
	233023 XTEEL-W-SS-150	Bascula digital baja capacidad, 150 Kg, 20 g, Indicador Acero Inoxidable Solo peso, estructura en acero Inoxidable, Kg, Lb, Plato 45x60 cm, LEXUS, Entrega: INMEDIATA	1	US\$ 432,66	US\$ 432,66	<input type="button" value="Borrar"/>

[Agregar otros productos](#)
[Agregar mas Basculas digitales](#)

Precios en Dolares Americanos. Icomterm : EXWOKS	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">SubTotal : \$</td> <td style="text-align: right;">432,66</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Des. % \$</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">IVA : \$</td> <td style="text-align: right;">0,00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Flete: \$</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">TOTAL : \$</td> <td style="text-align: right;">432,66</td> </tr> </table>	SubTotal : \$	432,66	Des. % \$		IVA : \$	0,00	Flete: \$		TOTAL : \$	432,66
SubTotal : \$	432,66										
Des. % \$											
IVA : \$	0,00										
Flete: \$											
TOTAL : \$	432,66										

Figura AXI.2. Cotización de la báscula digital

En la Figura AXI.3 se muestra la cotización de la envasadora.

**ECUA
PACK**

ENVASADORA VOLUMETRICA GRANULADOR EAG-20




La máquina es conveniente para el envasado en bolsas blandas de materiales granulares en el campo de comida, químicos diarios, medicina, etc. adopta una regulación de longitud de la bolsa continua y medidores tasa volumétricas ajustables para medición. Incluye controlador PLC + pantalla visualizador para regulación de medidas de fundas, codificador sobrepuesto hasta 3 líneas de cinta térmica para impresión de fechas de producción, estructura, tazas de medición y tolva fabricada en Acero inoxidable 304.

Puede utilizarse con film plásticos compuestos sellable al calor como: papel simple/PE, celofán/PE, lámina de aluminio/PE, BOPP/PE, nylon/PE, y otros materiales laminados compuestos, el espesor del film debe ser de 30~60 micrones (presentaciones pequeñas), el diámetro de núcleo del rollo debe ser de 75 mm, el diámetro de la bobina de película debería ser menor que 300mm y el peso del rollo de 15kg. El sellado de funda tipo almohada (3 costuras)

Voltaje(V/Hz)	AC 220/60 1ph
Potencia (W)	1300
Capacidad (bolsa/min)	20-60
Capacidad de envasado (ml)	0.5-20
Longitud de la bolsa (mm)	35-85
Tipo de sellado	3 lados
Ancho de la bolsa (mm)	25-70
Dimensiones externas (L*W*H) (mm)	730*500*1780
Peso neto (kg)	360

PRECIO SIN IVA: \$ 10.500usd


OBSERVACIONES:

La máquina cotizada es estándar para 1 tipo de presentación y forma de funda, para presentaciones adicionales se debe agregar formadores de fundas extras con un costo de \$600usd + IVA c/u; en el caso de taza de medición adicionales con un costo de \$ 850usd +IVA. Cliente deberá entregar muestras del producto a envasar y las medidas exactas de las fundas para confirmar el precio final de la máquina.

QUITO: Av. General Rumiñahui, #1539 y Juan de Dios - Valle San Rafael PBX: 593 26046711 - 14
 GUAYAQUIL: Av. J. T. Marengo Km 0,5 Cdla Adaco Cond. Fco Sanchez #200 Local #2 PB * Teléfono: 593 4 2281548/665
 Email: info@ecuapack.com www.ecuapack.com

Figura AXI.3. Cotización de la báscula digital

En la Figura AXI.4 se muestra la cotización del silo de almacenamiento.



Quito, 17 de abril de 2013 COTIZACIÓN No. 2013-41381-CIAP

Señores:
 Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros ESCUELA
 POLITÉCNICA NACIONAL
 Presente.

Atención: Gabriela Mijas
 Estimada Ingeniera

Por medio de la presente la compañía Sematech, pone a su consideración la cotización de :

Cant.	Descripción	Valor Unit. (USD)	Valor Total (USD)
1	Tanque cónico en ac Innox 304 de 2m de altura con casquete torresferico de 3mm , paredes y cono en ac Innox de 2mm , terminación en boca de diámetro 50mm. Patás en tubo de 2" Inoxidable	3.171,75	3.171,75
1	válvula de compuerta para 2"	80,00	80,00
1	entrega en acople tree clamp superior de 1 1/2" con tapon	40,00	40,00
		Sub Total	3.291,75
		I.V.A.	395,01
		Total	3.686,76

Nota:
 Cualquier trabajo adicional que no conste en esta cotización se lo hará luego de acordar el precio entre las partes

Forma de pago: 60% anticipo 40% contra entrega
 Tiempo de entrega: Dos meses
 Lugar de entrega: POR COORDINAR
 Validez de la oferta: 60 días

Ing. Fausto Pazmiño V.
 Presidente

MANTENIMIENTO INDUSTRIAL Y CALIBRACION
 DE INSTRUMENTOS

Dirección:
 Av. Ulpiano Ferrera 116-121
 Caltambo - Ecuador
 Teléfono: 591-02-4013540 /
 2822585
 sematech.ec@gmail.com
 www.sematech.ec

Figura AXI.4. Cotización del silo de almacenamiento

En la Figura AXI.5 se muestra la cotización del PET virgen.



NUTEC
REPRESENTACIONES

E-mail: ventalocal.ec@nutecamerica.com
 PBX: 3714140 FAX: 3714140 ext 6
 R.U.C. 0990833648001
 Lot. Ind. Inmaconsa - Vía a Daule km 9.5 calles
 Casucma y Quisqueñas



ISO 9001: 2002
 Registrado D.A.S.A.

VENTA LOCAL
OFERTA: 21061

Cliente : ESCUELA POLITECNICA NACIONAL Atención :	Fecha : 21/03/2013 Fax : 022588389																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">PRODUCTO</th> <th style="width: 10%;">Cantidad/Kg</th> <th style="width: 10%;">P. Unitario</th> <th style="width: 10%;">%Dcto.</th> <th style="width: 10%;">Precio Final \$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pat fast reheat Ramapet-ES11</td> <td style="text-align: center;">1.100,00</td> <td style="text-align: center;">2.100</td> <td style="text-align: center;">1,00</td> <td style="text-align: center;">2.079</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Sub - Total</td> <td style="text-align: right;">2.296,60</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Iva</td> <td style="text-align: right;">274,43</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Total</td> <td style="text-align: right;">2.561,33</td> </tr> </tbody> </table>	PRODUCTO	Cantidad/Kg	P. Unitario	%Dcto.	Precio Final \$	Pat fast reheat Ramapet-ES11	1.100,00	2.100	1,00	2.079	Sub - Total				2.296,60	Iva				274,43	Total				2.561,33	Forma de Pago: 100 % - CONTADO Validez de oferta: 1 día Entrega:
PRODUCTO	Cantidad/Kg	P. Unitario	%Dcto.	Precio Final \$																						
Pat fast reheat Ramapet-ES11	1.100,00	2.100	1,00	2.079																						
Sub - Total				2.296,60																						
Iva				274,43																						
Total				2.561,33																						
OBSERVACIONES / INSTRUCCIONES:																										
ORDEN DE COMPRA APROBADA <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border-top: 1px solid black; width: 20%; text-align: center;">VENDEDOR</div> <div style="border-top: 1px solid black; width: 20%; text-align: center;">CLIENTE</div> </div>																										

Cupo de crédito disponible: 0,00

Vto. Bueno Crédito

SOMOS EL UNICO PROVEEDOR EN ECUADOR CON MAS DE 80 RESINAS PLASTICAS EN STOCK

Consulte nuestra página web: www.nutecamerica.com

Codigo: 05/1/PR-02-2
 Revisión: 7
 Fecha: 24-07-2007

Figura AXI.5. Cotización del PET virgen

En la Figura AXI.6 se muestra la cotización del PBT virgen.



Oficina Centro: N980 de las Juvianas E1-101 y Panamericana Norte
Teléfono: (099) 2 2684-608 al 2 2684-662, 2 2682-987, 2 461-206
Fax: (099) 2 2681-207

COTIZACION

Para:	Sres. POLITECNICA NACIONAL	Teléfono:	
De:	Angelica Mbreira PF Group S.A	Ventas Fecha:	4-feb-2013

Estimada Sr. Chanço

Por medio de la presente doy a conocer el precio de nuestro producto como sigue:

Cantidad Kg.	Descripción del producto	Precio Und.	Valor Total
25	RAMSTER PF 100 BK 10	\$ 5,19	\$ 129,75
25	RAMSTER PF 201 BK 10	\$ 5,19	\$ 129,75
SUBTOTAL			\$ 259,50
IVA 12%			\$ 31,14
TOTAL			\$ 290,64

Plazo de entrega: Inmediata
Forma de Pago: credito 30 dias
Presentación: sacos de 25kg

Esperamos vernos favorecidos con su grata orden,

Atentamente,

Angelica Mbreira
amoreira@pfgroup-ec.com
PF GROUP S.A.

Figura AXI.6. Cotización del PBT virgen

En la Figura AXI.7 se muestra la cotización del PET reciclado.



COTIZACIÓN

Ing. Andres Tobar Salas --- 25 de Marzo del 2013

Atención: Escuela Politecnica Nacional
 Cargo:
 Provincia: Pichincha Ciudad: Quito
 e-mail: edmv87@gmail.com
 Tel(s): Fax:

Estimada:

Atencion a su solicitud, me permito enviarle la cotización correspondiente a los productos de su interés.

ESCAMA LAVADA DE R - PET 12							
Cantidad	Producto	Composición	Codigo	Precio Unit	SUBTOTAL	IVA	TOTAL
25 kg	Escama Lavada De R - PET 12	98 % Claro 2 % Celeste	1 - 7400 - 457	1,00	25,00	3,06	28,06

RESINA DE R - PET RECYPET 84							
Cantidad	Producto	Composición	Codigo	Precio Unit	SUBTOTAL	IVA	TOTAL
25 kg	Resina De R - PET RECYPET - 84	98 % Claro 2 % Celeste	1 - 7473 - 428	1,40	35,00	4,29	39,29

Figura AXI.7. Cotización del PET reciclado

En la Figura AXI.8 se muestra la cotización del PBT reciclado.

Product Description

—ILSAN ENTERPRISE



pbt.scrap
Created Date: 2013-03-28

Printed Date: 2013-05-22
Expiry Date: 2013-11-18
Min. Order Quantity: 200 Ton
Price Term: FOB
Port: Busan
Price: 2,000 \$/t
Payment Terms: LC, T/T

Brief Product Description

Dear Sir / Madam,

We can supply you our PBT scrap (Flammable grade) at competitive price from South Korea.

Product Attributes

Place of Origin	Gyeonggi-do South Korea
-----------------	-------------------------

Detailed Product Description

Dear Sir / Madam, We can supply you our PBT scrap (Flammable grade) at competitive price from South Korea. Firstly, we are very pleasure to introduce our company to you. We have established the ILSAN ENTERPRISE () for engineering plastics and metal protective coating in 1995. Our sales items are various kinds of plastics (standard goods, supplier : and coating powders (standard goods, supplier :) Of course, we are supply off grade of materials by RADICIPLASTICS, various scrap and roll films by Korean industry and powder paints to domestic market and other countries. In this time, we have stocked following items. For your reference, we can continuously supply you our stocked materials or your request materials at competitive price. If you are interested in our materials. One step forward. If you need other materials (PC, HIPS, PPS, ...etc) , we can confirm you the price after checking and market search. For your reference, we are sending you our stocked materials (these are :Duro-PET films/domestic: nff and waste. ps powder/20% of melatum, PPA/Sobay 1,000 series, PA6T/8(urany, ...etc) as attached files. 1. Duro-PET Film rolls (Attached photo .and) PET FILM 100 TONS (width : 1,000 m/in- 1300 m/m, thickness : 0.05 m/m, 1 layer not 2 or 3 layer, colour : natural film or various colour printing film) 2. STPG3095 (Attached photo) - 2 or 3 layers PET films 3. Scrap materials PPA 150 TONS (unfilled grade, white, V0) PA6T 100 TONS (unfilled grade, white, flammable) PA6T 50 TONS (unfilled grade, white and black, V0) PS POWDER 100 TONS (nff grade, white powder, moisture content : 20%) PBT 50 TONS (G/F reinforced grade, black colour) LDPE 20 TONS ABS 40 TONS PVB 200-300MT PBT 200 MT...etc. If you have any question for this matter, please do not hesitate to contact us. ILSAN ENTERPRISE Address : # 399-9, Naeyu-Dong, Duckyang-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, South Korea. Tel : ++ 82 2 375 4273, Fax : ++ 82 2 375 4274, M.P : ++ 82 10 4367 4773 Att: Mr. Kim, chung-ho ,web site : (e-mail :) Looking forward to hearing from you, we remain With best regards, Kim, chung-ho

Company Profile

Dear Sir/Madam, Firstly, we are very pleasure to introduce our company to you. We have established the ILSAN ENTERPRISE (www.ilsan.net) for engineering plastics and metal protective coating in 1995. Our sales items are various kinds of plastics (standard goods, supplier : www.radiciplastics.com) and coating powders (standard goods, supplier : www.pliccoat.com) . Of course, we are supply off grade of materials by RADICIPLASTICS, various scrap and roll films by Korean industry to domestic market and other countries. If you have any question for this matter, please do not hesitate to contact us. ILSAN ENTERPRISE Address : # 399-9, Naeyu-Dong, Duckyang-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, South Korea. Tel : ++ 82 2 375 4273, Fax : ++ 82 2 375 4274, M.P : ++ 82 10 4367 4773 Att: Mr. Kim, chung-ho ,web site : www.ilsan.net Looking forward to hearing from you, we remain With best regards, Kim, chung-ho

Company Name : ILSAN ENTERPRISE
Contact Name : Kim chung-ho
Tel : 82 2357 4273
Fax : 82 2357 4274
Mobile : 82 102574273
Address : # 399-9 Naeyu-Dong, Duckyang-Gu
Country/Region : South Korea
Website : http://kr101739442.en.gongchang.com

page 1

Figura AXI.8. Cotización del PBT reciclado

En la Figura AXI.9 se muestra la cotización de los sacos de PP.



*Héctor Benjamin
Gallardo Herrera*
R.U.C:1700834243001

Cotización N° 8251

EMPRESA:

Atención: Sr. GABRIELA MIJAS

E-mail:gdmv87@gmail.com

Presente.-

Nos es grato cotizar las siguientes medidas solicitadas:

PRODUCTO	CANTIDAD MÍNIMA	PVP. Unidad	TOTAL
Sacos de polipropileno tejido normal blanco 60cm./ Hancho *90cm. alto impreso a cuatro colores	100	\$ 0,250000	\$ 25,00
sacos de polipropileno tejido normal blanco 60cm./ Hancho *105cm. Alto impreso acuatro colores	100	\$ 0,223214	\$ 22,32
			\$ 0,00
		Subtotal	\$ 47,32
		Iva	\$ 3,68
		Total	\$ 53,00

NOTAS EXPLICATIVAS:

- Los precios detallan el 12% del impuesto al valor agregado(IVA)
- Tiempo de entrega: Inmediato
- Forma de Pago: 100 % Contraentrega.
- En caso de requerir mayor información favor comuníquese con los teléfonos o correos al
: www.costaleshbgH.com
- Oferta válida hasta:27- ABRIL 2013


ATENTAMENTE

Rocafuerte Oe9-75 y Chimborazo Telf.: 02-295-7932-/Fax 02-228-4382
E-mail: información@costaleshbgH.com-ventas@costaleshbgH.com
www.costaleshbgH.com

Figura AXI.9. Cotización de los sacos de PP

ANEXO XII

CÁLCULOS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO

1. Cálculo de la cantidad de sacos de 25 kg producidos mensualmente:

$$\frac{260 \text{ kg mezcla}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ saco}}{25 \text{ kg mezcla}} \times \frac{20 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = 208 \frac{\text{sacos de 25 kg}}{\text{mes}}$$

2. Cálculo del costo de materia prima por saco

Ejemplo de cálculo para la mezcla reciclada:

- PET reciclado

$$\frac{260 \text{ kg mezcla}}{\text{día}} \times \frac{95 \text{ kg PET reciclado}}{100 \text{ kg mezcla}} \times \frac{28,06 \$}{25 \text{ kg PET reciclado}} \times \frac{20 \text{ días}}{208 \text{ sacos}} = 26,66 \frac{\$}{\text{saco}}$$

- PBT reciclado

$$\frac{260 \text{ kg mezcla}}{\text{día}} \times \frac{5 \text{ kg PBT reciclado}}{100 \text{ kg mezcla}} \times \frac{2,50 \$}{1 \text{ kg PBT reciclado}} \times \frac{20 \text{ días}}{208 \text{ sacos}} = 3,13 \frac{\$}{\text{saco}}$$

$$\text{Costo Total} = \text{Costo de PET reciclado} + \text{Costo de PBT reciclado} = 29,78 \frac{\$}{\text{saco}}$$

3. Cálculo del costo de mano de obra por saco

Para el cálculo del costo mensual de mano de obra se tomaron los datos de la Tabla 3.19 en donde se detallan cada uno de los rubros establecidos para determinar el salario de los dos trabajadores que laborarán en la planta piloto.

$$\frac{813 \$}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{208 \text{ sacos}} = 3,91 \frac{\$}{\text{saco}}$$

4. Cálculo del costo de agua por saco

Para el cálculo del costo del agua se consideró el consumo de la extrusora monohusillo y de la bandeja de enfriamiento. Para ambos casos, se realizará un cambio de agua dos veces por semana

- Consumo mensual de agua de extrusora monohusillo

$$\frac{20 \text{ L}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{8 \text{ veces}}{1 \text{ mes}} = \frac{0,16 \text{ m}^3}{\text{mes}}$$

- Consumo mensual de agua de bandeja de enfriamiento

$$\frac{0,32 \text{ m}^3}{\text{día}} \times \frac{8 \text{ veces}}{1 \text{ mes}} = \frac{2,56 \text{ m}^3}{\text{mes}}$$

- Consumo total de agua

$$\frac{0,16 \text{ m}^3}{\text{mes}} + \frac{2,56 \text{ m}^3}{\text{mes}} = \frac{2,72 \text{ m}^3}{\text{mes}}$$

- Costo mensual de agua consumida

$$\frac{2,72 \text{ m}^3}{\text{mes}} \times \frac{0,72 \$}{1 \text{ m}^3} = 1,96 \frac{\$}{\text{mes}}$$

- Costo mensual por alcantarillado (36,6 %):

$$0,366 \times 1,96 \frac{\$}{\text{mes}} = 0,72 \frac{\$}{\text{mes}}$$

- Costo mensual incluido \$2,10 por comercialización:

$$1,96 \frac{\$}{\text{mes}} + 0,72 \frac{\$}{\text{mes}} + 2,10 \frac{\$}{\text{mes}} = 4,78 \frac{\$}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{208 \text{ sacos}} = 0,02 \frac{\$}{\text{saco}}$$

5. Cálculo del costo de energía eléctrica por saco

Para el cálculo del consumo mensual de energía eléctrica se tomaron los rubros establecidos en la Tarifa G5 (Tarifa General Baja Tensión con Demanda (BTGD)) del pliego tarifario vigente desde el 1 al 30 de Abril de 2013 (p. 18) y los valores de la Tabla 3.17 en donde se detalla la potencia instalada de cada equipo. Se consideró un factor de corrección de 0,6 debido a que los equipos no funcionan al 100 % de su capacidad.

CARGOS:

- \$ 1,414 por factura, en concepto de Comercialización, independiente del consumo de energía.
- \$ 4,182 mensuales por cada KW de demanda facturable como mínimo de pago, sin derecho a consumo, multiplicado por un factor de corrección (FC), que en ningún caso será menor que 0,60.

$$4,182 \frac{\$}{\text{kW}} \times 67,65 \frac{\text{kW}}{\text{mes}} \times 0,06 = 169,75 \frac{\$}{\text{mes}}$$

- \$ 0,068 por cada kWh en función de la energía consumida

$$0,068 \frac{\$}{\text{kWh}} \times \frac{354,9 \text{ kWh}}{\text{día}} \times \frac{20 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = 482,66 \frac{\$}{\text{mes}}$$

- 6 % del valor de la planilla por consumo por concepto de alumbrado Público

$$0,06 \times 482,66 \frac{\$}{\text{mes}} = 28,96 \frac{\$}{\text{mes}}$$

- \$ 19,08 contribución para el Cuerpo de Bomberos, para consumidores industriales con demanda

- 10 % del valor de la planilla por consumo por tasa de recolección de basura

$$0,10 \times 482,66 \frac{\$}{\text{mes}} = 48,27 \frac{\$}{\text{mes}}$$

- Costo total por consumo de energía eléctrica:

$$1,414 \frac{\$}{\text{mes}} + 169,75 \frac{\$}{\text{mes}} + 482,66 \frac{\$}{\text{mes}} + 28,96 \frac{\$}{\text{mes}} + 19,08 \frac{\$}{\text{mes}} + 48,27 \frac{\$}{\text{mes}} = 750 \frac{\$}{\text{mes}}$$

$$750 \frac{\$}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{208 \text{ sacos}} = 3,61 \frac{\$}{\text{saco}}$$

6. Cálculo del costo de saco unitario de PP

$$\frac{25 \$}{100 \text{ sacos}} = 0,25 \frac{\$}{\text{saco}}$$

7. Cálculo del costo de producción del saco de mezcla reciclada

= costo de materia prima + costo de salario + costo de agua + costo de energía eléctrica
+ costo de saco de PP

$$= \frac{29,78 \$}{\text{saco}} + \frac{3,91 \$}{\text{saco}} + \frac{0,02 \$}{\text{saco}} + \frac{3,61 \$}{\text{saco}} + \frac{0,25 \$}{\text{saco}} = 37,57 \frac{\$}{\text{saco}}$$