

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA MEDIANTE EL RECICLAJE QUÍMICO DE DESECHOS DE POLIETILENTEREFTALATO (PET)

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

ALEXANDRA ELIZABETH PADILLA ALOMOTO

DIRECTOR: ING. FRANCISCO JAVIER QUIROZ CHÁVEZ

Quito, julio 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Alexandra Elizabeth Padilla Alomoto, 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.

Alexandra Elizabeth Padilla Alomoto

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alexandra Elizabeth Padilla Alomoto, bajo mi supervisión.

Ing. Francisco Quiroz
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia: a mi madre, mi padre, mis tías Gloria, Beatriz y Leonor y mis hermanos Diego, María Fernanda y Fernando por su amor incondicional, comprensión, paciencia, por confiar en mí y apoyarme en todos mis sueños.

Gracias a mis compañero del CIAP, por ayudarme en todos los momentos en la elaboración del proyecto de titulación.

Gracias a mi director, Ing. Francisco Quiroz por su guía acertada en este proyecto.

Al Dr. Francisco Cadena por su colaboración para la realización de este proyecto.

Al Ing. Miguel Aldás por sus consejos, ayuda técnica y amistad.

A Ivancito y a Liz por sus consejos técnicos, amistad y gentileza.

A mis queridos amigos Dianita, Viviana, Juan Pablo, Nora, Eliana, Cris por tantos buenos momentos compartidos.

A mis amados gatitos Lolita y Lucas por darme su infinito amor a su manera.

A todas las personas que me conocen y colaboraron para alcanzar esta meta.

DEDICATORIA

A mi familia por hacer posible este sueño. En especial a mi madre por ser mi ejemplo a seguir. Gracias por todo mamita, por enseñarme a seguir adelante en cualquier circunstancia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
1 PARTE TEÓRICA	1
1.1 Propiedades químicas de las botellas de PET	1
1.1.1 Generalidades	1
1.1.2 Estructura y morfología del PET	3
1.1.3 Obtención del PET	4
1.1.4 Degradación del PET	5
1.2 Reciclaje químico del PET	9
1.2.1 Glicólisis	12
1.2.2 Hidrólisis	15
1.2.3 Metanólisis	18
1.2.4 Métodos de análisis del producto de la depolimerización del PET	19
1.3 Resinas poliéster insaturadas	23
1.3.1 Generalidades	23
1.3.2 Estructura de resinas poliéster insaturadas	24
1.3.3 Síntesis de resinas poliéster insaturadas	29
1.3.4 Mecanismos de curado de resinas poliéster insaturadas	31
2 PARTE EXPERIMENTAL	35
2.1 Depolimerización de las botellas de pet mediante una glicólisis alcalina	35
2.1.1 Preparación de las botellas para su depolimerización	35
2.1.2 Caracterización de la materia prima	37
2.1.3 Pruebas preliminares para selección del método de reciclaje químico	38
2.1.4 Glicólisis alcalina de las botellas de PET	40
2.2 Síntesis de la resina poliéster insaturada	44
2.2.1 Obtención de la resina poliéster insaturada	44
2.2.2 Determinación del número ácido	45
2.2.3 Curado de la resina poliéster insaturada	46
2.3 Evaluación de la resina poliéster insaturada	46
2.3.1 Análisis de la resina poliéster insaturada por espectrofotometría infrarroja (FT-IR)	47
2.3.2 Determinación del porcentaje de sólidos	47

2.3.3	Determinación de la dureza	47
2.4	Dimensionamiento del reactor para la depolimerización de desechos de PET y del reactor para la polimerización de resina de poliéster insaturada	48
2.4.1	Dimensionamiento del reactor para la depolimerización de desechos de PET	48
2.4.2	Dimensionamiento del reactor para la polimerización de resina poliéster insaturada	48
2.4.3	Diseño del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato	50
2.5	Análisis del costo de producción de resinas poliéster insaturadas	52
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1	Depolimerización de las botellas de PET mediante una glicólisis alcalina	53
3.1.1	Caracterización de la materia prima	53
3.1.2	Pruebas preliminares para selección del método de reciclaje químico	57
3.1.3	Glicólisis alcalina	59
3.1.4	Caracterización del producto obtenido en la glicólisis alcalina del PET	61
3.2	Síntesis de la resina poliéster insaturada	66
3.2.1	Caracterización de la resina poliéster insaturada	70
3.2.2	Determinación del número ácido	75
3.2.3	Curado de la resina poliéster insaturada	79
3.3	Evaluación de la resina poliéster insaturada	83
3.3.1	Determinación del porcentaje de sólidos	83
3.3.2	Determinación de la dureza	84
3.4	Dimensionamiento del reactor para la depolimerización de desechos de PET y del reactor para la polimerización de resina de poliéster insaturada	85
3.4.1	Dimensionamiento del reactor para la depolimerización de desechos de PET	85
3.4.2	Dimensionamiento del reactor para la polimerización de resina poliéster insaturada	90
3.4.3	Diseño del proceso y planta piloto para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato	93
3.5	Análisis del costo de producción de resinas poliéster insaturadas	107
3.5.1	Costo de la materia prima	107

3.5.2	Costo de equipos principales	107
3.5.3	Inversión fija	108
3.5.4	Estimación del costo de producción	108
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
4.1	Conclusiones	110
4.2	Recomendaciones	112
	BIBLIOGRAFÍA	113
	ANEXOS	122

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1.1. Métodos de reciclaje químico: agentes solvolíticos y productos	11
Tabla 1.2. Efecto del glicol sobre la temperatura de distorsión	25
Tabla 1.3. Efecto del ácido saturado sobre la temperatura de distorsión	28
Tabla 1.4. Rango de temperatura óptima para iniciadores de curado de resinas de poliéster insaturadas	33
Tabla 2.1. Condiciones de operación de la prensa para la obtención de la lámina de PET	37
Tabla 2.2. Concentración de la solución de ácido sulfúrico	39
Tabla 2.3. Condiciones de operación del reactor para la depolimerización	40
Tabla 2.4. Condiciones de operación de la prensa para la obtención de la pastilla de bromuro de potasio	43
Tabla 2.5. Condiciones de operación del reactor para la polimerización de la resina	44
Tabla 2.6. Composición de las resinas	45
Tabla 2.7. Proporciones típicas para el diseño de un agitador tipo turbina	49
Tabla 2.8. Importaciones de PET en los últimos 3 años	50
Tabla 3.1. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la botella de PET	55
Tabla 3.2. Resultado de la hidrólisis del PET	58
Tabla 3.3. Rendimiento de la glicólisis alcalina del PET a diferentes relaciones g PET/ml EG	59
Tabla 3.4. Parámetros para la glicólisis alcalina del PET	60
Tabla 3.5. Rendimiento de la glicólisis alcalina del PET con una relación g PET/ml EG=0,4	60
Tabla 3.6. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro del	

	producto de la glicólisis del PET	63
Tabla 3.7.	Composición del producto de la glicólisis alcalina del PET determinada mediante análisis RMN	65
Tabla 3.8.	Condiciones de operación durante la síntesis de la resina poliéster insaturada	66
Tabla 3.9.	Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la resina 1	71
Tabla 3.10.	Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la resina 3	72
Tabla 3.11.	Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la resina 5	74
Tabla 3.12.	Resumen comparativo de la caracterización de las resinas sintetizadas	74
Tabla 3.13.	Cantidad de agua formada durante la reacción de polimerización	79
Tabla 3.14.	Tiempo y temperatura de curado de las resinas	80
Tabla 3.15.	Porcentaje de sólidos	84
Tabla 3.16.	Dureza de las resinas	85
Tabla 3.17.	Condiciones de operación del reactor para la depolimerización del PET	86
Tabla 3.18.	Dimensiones del reactor de depolimerización	87
Tabla 3.19.	Proporciones típicas para el diseño de un agitador tipo turbina	88
Tabla 3.20.	Dimensiones del sistema de agitación	89
Tabla 3.21.	Sistema de calentamiento	90
Tabla 3.22.	Condiciones de operación del reactor para la polimerización	90
Tabla 3.23.	Dimensionamiento del reactor de polimerización	91
Tabla 3.24.	Diseño del sistema de agitación	92
Tabla 3.25.	Sistema de calentamiento	93

Tabla 3.26.	Resultados del análisis de ponderación de la localización	96
Tabla 3.27.	Condiciones de operación para el proceso de depolimerización	98
Tabla 3.28.	Condiciones de operación para el proceso de polimerización	99
Tabla 3.29.	Lista de equipos seleccionados para el proceso de obtención de resinas poliéster insaturada	102
Tabla 3.30.	Dimensiones de los equipos seleccionados para el proceso de obtención de resinas poliéster insaturada	103
Tabla 3.31.	Consumo energético de los equipos seleccionados para el proceso	104
Tabla 3.32.	Costo de la materia prima	107
Tabla 3.33.	Costo de los equipos principales	108
Tabla 3.34.	Inversiones fijas para la planta piloto diseñada	108
Tabla 3.35.	Costo del agua, energía eléctrica y recargos extras	109
Tabla 3.36.	Costo del kilogramo de resina poliéster insaturada	109
Tabla AI.1.	Prueba preliminar 1 de glicólisis alcalina del PET	123
Tabla AI.2.	Prueba preliminar 2 de glicólisis alcalina del PET	123
Tabla AI.3.	Prueba preliminar 3 de glicólisis alcalina del PET	124
Tabla AI.4.	Prueba preliminar 4 de glicólisis alcalina del PET	124
Tabla AII.1.	Prueba 1 de glicólisis alcalina del PET	125
Tabla AII.2.	Prueba 2 de glicólisis alcalina del PET	125
Tabla AII.3.	Prueba 3 de glicólisis alcalina del PET	126
Tabla AII.4.	Prueba 4 de glicólisis alcalina del PET	126
Tabla AII.5.	Prueba 5 de glicólisis alcalina del PET	126
Tabla AII.6.	Prueba 6 de glicólisis alcalina del PET	127
Tabla AII.7.	Prueba 7 de glicólisis alcalina del PET	127

Tabla AII.8.	Prueba 8 de glicólisis alcalina del PET	127
Tabla AII.9.	Prueba 9 de glicólisis alcalina del PET	128
Tabla AII.10.	Prueba 10 de glicólisis alcalina del PET	128
Tabla AIII.1.	Composición de la resina poliéster insaturada 1	129
Tabla AIII.2.	Composición de la resina poliéster insaturada 3	129
Tabla AIII.3.	Composición de la resina poliéster insaturada 4	130
Tabla AIII.4.	Composición de la resina poliéster insaturada 5	130
Tabla AIII.5.	Composición de la resina poliéster insaturada 6	130
Tabla AIII.6.	Composición de la resina poliéster insaturada 7	131
Tabla AIII.7.	Composición de la resina poliéster insaturada 9	131
Tabla AIV.1.	Datos experimentales de la resina 1	132
Tabla AIV.2.	Datos experimentales de la resina 3	132
Tabla AIV.3.	Datos experimentales de la resina 4	133
Tabla AIV.4.	Datos experimentales de la resina 5	133
Tabla AIV.5.	Datos experimentales de la resina 6	133
Tabla AIV.6.	Datos experimentales de la resina 7	134
Tabla AIV.7.	Datos experimentales de la resina 9	134
Tabla AVI.1.	Parámetros del proceso de depolimerización	138
Tabla AVI.2.	Propiedades del etilenglicol	153
Tabla AVI.3.	Propiedades del aceite	154
Tabla AVII.1.	Balance de masa de los productos por proceso	157
Tabla AVIII.1.	Dimensiones de los silos de almacenamiento	160
Tabla AVIII.2.	Dimensiones del tanque de almacenamiento de resina poliéster	162
Tabla AIX.1.	Hoja de especificación de la línea de triturado, lavado y secado	163

Tabla AIX.2.	Hoja de especificación de los silos de almacenamiento	164
Tabla AIX.3.	Hoja de especificación del reactor para la depolimerización	165
Tabla AIX.4.	Hoja de especificación de los tanques de agitación	166
Tabla AIX.5.	Hoja de especificación de la centrífuga	167
Tabla AIX.6.	Hoja de especificación del secador	168
Tabla AIX.7.	Hoja de especificación del reactor para la polimerización de la resina poliéster	169
Tabla AIX.8.	Hoja de especificación del tanque de almacenamiento de la resina poliéster	170
Tabla AXI.1.	Precios de las materias primas	183
Tabla AXI.2.	Salario de los trabajadores	184

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1.	Demanda mundial de termoplásticos por tipo, 2011 1
Figura 1.2.	Principales aplicaciones de PET: fibras películas y grado botella 2
Figura 1.3.	Poli (etilén tereftalato) (PET) 3
Figura 1.4.	Obtención de BHTE vía esterificación y transesterificación 4
Figura 1.5.	Degradación del PET mediante hidrólisis 6
Figura 1.6.	Formación de acetaldehído 7
Figura 1.7.	Degradación termo-oxidativa del PET 9
Figura 1.8.	Usos para el PET reciclado 10
Figura 1.9.	Esquema del reactor para glicólisis del PET 12
Figura 1.10.	Reacción de glicólisis del PET 13
Figura 1.11.	Reacción de hidrólisis ácida del PET 16
Figura 1.12.	Reacción de hidrólisis alcalina del PET 17
Figura 1.13.	Reacción de metanólisis del PET 19
Figura 1.14.	Principio de reflectancia total atenuada 20
Figura 1.15.	Termograma de un polímero con sus transiciones térmicas 22
Figura 1.16.	Reacción de formación resina poliéster insaturada 30
Figura 1.17.	Reacción de reticulación del poliéster insaturado con el monómero de estireno 32
Figura 2.1.	Diagrama de flujo para la preparación botellas de PET 36
Figura 2.2.	Diagrama de flujo de glicólisis alcalina de las botellas PET 41
Figura 3.1.	Espectro infrarrojo de una botella marca Tesalia superpuesto con el estándar de PET 53
Figura 3.2.	Espectro infrarrojo de una botella marca Dasani superpuesto

	con el estándar de PET	54
Figura 3.3.	Termograma obtenido para la determinación de la temperatura de fusión y transición vítrea de la botella marca Tesalia	56
Figura 3.4.	Termograma obtenido para la determinación de la temperatura de fusión y transición vítrea de la botella marca Dasani	57
Figura 3.5.	Resultado no satisfactorio de la hidrólisis ácida del PET	58
Figura 3.6.	Espectro infrarrojo del producto de la glicólisis	61
Figura 3.7.	Espectros infrarrojos del producto de la glicólisis superpuestos con estándar del ácido tereftálico	62
Figura 3.8.	Espectros infrarrojos del producto de la glicólisis superpuestos con estándar del ácido isoftálico	64
Figura 3.9.	Espectro 1 RMN del producto de la glicólisis alcalina	64
Figura 3.10.	Espectro 2 RMN del producto de la glicólisis alcalina	65
Figura 3.11.	Resina 1: Material Reciclado	67
Figura 3.12.	Resina 3: Material Reciclado Y Puro	67
Figura 3.13.	Resina 4: Material Puro	68
Figura 3.14.	Resina 5: Material Puro	68
Figura 3.15.	Resina 6: Material Reciclado	68
Figura 3.16.	Resina 7: Material Reciclado Y Puro	69
Figura 3.17.	Resina 9: Material Reciclado	69
Figura 3.18.	Espectro infrarrojo de la resina 1	70
Figura 3.19.	Espectro infrarrojo de la resina 3	72
Figura 3.20.	Espectro infrarrojo de la resina 5	73
Figura 3.21.	Número ácido de las resinas obtenidas	75
Figura 3.22.	Número ácido de las resinas obtenidas a partir de PET reciclado	76

Figura 3.23.	Comparación de los números ácidos de las resinas obtenidas con PET reciclado y las resinas obtenidas del material puro	77
Figura 3.24.	Comparación de los números ácidos de las resinas obtenidas con mezcla de material reciclado y puro y las resinas obtenidas del material puro	78
Figura 3.25.	Temperatura alcanzada durante la reacción de síntesis de resina poliéster insaturada	78
Figura 3.26.	Resina 1: Material reciclado	81
Figura 3.27.	Resina 3: Material reciclado y puro	81
Figura 3.28.	Resina 5: Material puro	82
Figura 3.29.	Resina 6: Material reciclado	82
Figura 3.30.	Resina 7: Material reciclado y puro	82
Figura 3.31.	Resina 9: Material reciclado	83
Figura 3.32.	Resina comercial	83
Figura 3.33.	Cabeza torisférica	86
Figura 3.34.	Determinación del tipo de agitador para el reactor de depolimerización	88
Figura 3.35.	Agitador tipo turbina	89
Figura 3.36.	Determinación del tipo de agitador para el reactor de polimerización	92
Figura 3.37.	Ponderación de localización de la planta	95
Figura 3.38.	Localización de la planta piloto	97
Figura 3.39.	Diagrama de bloques (BFD) del proceso para la obtención de resina poliéster	100
Figura 3.40.	Balance de masa del proceso de obtención de resina poliéster	101
Figura 3.41.	Diagrama de flujo (PFD) del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET)	105
Figura 3.42.	Plano de distribución de la planta piloto	106

Figura AV.1.	Ficha técnica de una resina poliéster insaturada	136
Figura AV.2.	Ficha técnica de una resina poliéster insaturada (continuación)	137
Figura AV.1.	Valores de esfuerzo permitido de los aceros inoxidables	142
Figura AV.2.	Cabeza torisférica	143
Figura AV.3.	Presión interna en casco cilíndrico	144
Figura AV.4.	Presión externa en una cabeza torisférica	147
Figura AV.5.	Determinación del factor A	149
Figura AVI.6.	Determinación del factor B	150
Figura AVI.7.	Cálculo del número de potencia	152
FiguraAVII.1.	Dimensiones del silo de almacenamiento de sólidos según la norma API 650-1998	160
Figura AVII.2.	Dimensiones del tanque de almacenamiento para líquidos según la norma API 650-1998	161
Figura AX.1.	Cotización de la Paca de PET	171
Figura AX.2.	Cotización de los glicoles, anhídrido maleico y estireno	172
Figura AX.3.	Cotización del hidróxido de sodio	173
Figura AX.4.	Cotización de la línea de triturado, lavado y secado de las botellas de PET	174
Figura AX.5.	Cotización del reactor de depolimerización	175
Figura AX.6.	Cotización del reactor de Polimerización	176
Figura AX.7.	Cotización de los silos y tanque de almacenamiento	177
Figura AX.8.	Cotización del tanque agitado 1	178
Figura AX.9.	Cotización del tanque agitado 2	179
Figura AX.10.	Cotización del tanque agitado 3	180
Figura AX.11.	Cotización de la centrífuga	181

Figura AX.12. Cotización del horno secador

182

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Cálculo del rendimiento de la glicólisis del PET (Pruebas preliminares)	123
ANEXO II	
Cálculo del rendimiento de la glicólisis del PET (Pruebas definitivas)	125
ANEXO III	
Resina poliéster insaturada sintetizadas	129
ANEXO IV	
Determinación del número ácido	132
ANEXO V	
Ficha técnica de una resina poliéster insaturada comercial	136
ANEXO VI	
Dimensionamiento de los reactores	138
ANEXO VII	
Balance de masa del proceso	157
ANEXO VIII	
Cálculos realizados para la selección de equipos	159
ANEXO IX	
Hojas de especificación de los equipos	163
ANEXO X	
Cotizaciones de la materia prima y equipos	171
ANEXO XI	
Cálculos para el análisis económico preliminar	183

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo el reciclaje químico de las botellas de polietilentereftalato (PET) para luego diseñar un proceso para obtención de resina poliéster insaturada a partir de PET reciclado.

Después de caracterizar las botellas se realizó el reciclaje químico por medio de una glicólisis alcalina, el producto obtenido se analizó mediante la técnicas FT-IR y RMN con las cuales se determinó la composición: 87,7 % ácido tereftálico; 5,7% de bis (hidroxi etilen tereftalato); 4,9 % de etilenglicol y 1,7 de ácido isoftálico. Por tanto, es un método eficaz para reciclar PET con rendimientos mayores al 99 %.

Se elaboró resinas con diferente formulación: material reciclado, material puro y mezcla de material reciclado y puro para determinar el tiempo que tardan en polimerizar, así, las resinas elaboradas con material reciclado tardaron (18 h) el triple que las resinas sintetizadas con materiales puros. La resina sintetizada a partir de material reciclado presentó un contenido de sólidos de 62,5% y un valor de dureza shore D de 48, parámetros que se encuentran dentro del rango de una resina comercial.

Se realizó el diseño del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET). El diseño incluyó el dimensionamiento de los reactores para la depolimerización y la polimerización que consta con sistema de agitación y calentamiento. Mediante los balances de masa correspondientes y en función del volumen de botellas procesadas (500 kg/día), se seleccionaron y dimensionaron los equipos principales. Se obtuvo el diagrama de bloques y flujo del proceso así como el plano de distribución en planta para una superficie de 984 m².

Finalmente se llevó a cabo un análisis preliminar de costos, para lo cual se buscaron datos actualizados de las materias primas, de los equipos. Se determinó que el costo de producción por kilogramo de resina es de 4,56 \$, valor mayor en comparación a una resina comercial que se encuentra a 3,94 \$ por kilogramo.

INTRODUCCIÓN

La producción y consumo de polímeros han aumentado en los últimos años debido a su gran diversidad, propiedades físicas, resistencia a la corrosión, facilidad de producción, variedad de aplicaciones y bajo costo en comparación a los materiales naturales como el papel, madera, algodón, entre otros. Sin embargo, son causantes de contaminación debido a la inadecuada disposición de los desechos, el polietilentereftalato (PET) forma parte de este grupo.

Según los datos oficiales del Banco Central del Ecuador, las importaciones de PET en el Ecuador se han incrementado en un 5,4 % desde el año 2009. Las importaciones de PET en el año 2011 corresponden a 47 000 Toneladas, razón por la cual la eliminación de estos desechos de PET se convierte en un problema que no podemos ignorar (Banco Central del Ecuador, 2012).

La prevención de la contaminación es fundamental para reducir la generación de desechos y el reciclaje químico representa una alternativa eficaz para el aprovechamiento de desechos de PET post consumo, además presenta la ventaja de poder integrar fácilmente el producto obtenido de la depolimerización en la producción convencional del PET y elaboración de resinas poliéster insaturadas (Achilias y Karayannidis, 2004, p. 387).

Por tanto, este estudio busca establecer la factibilidad de obtener resina poliéster insaturada a partir del reciclaje químico del PET. Las resinas tienen un amplio rango de aplicaciones en la industria de la construcción, industria automotriz y en la industria de la madera, también están presentes en los mangos para paraguas y cuchillos (Malik, Choudhary y Varma K., 2000, p. 161; Müller 1996, p. 81).

Los resultados obtenidos permitirán el diseño de un proceso para la obtención de resina poliéster insaturada a mediante el reciclaje químico de desechos de PET.

1 PARTE TEÓRICA

1.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS BOTELLAS DE PET

1.1.1 GENERALIDADES

En las últimas décadas los plásticos se han convertido en los materiales dominantes en la industria para alcanzar los desafíos tecnológicos requeridos por la sociedad. La producción mundial de plásticos en el 2011 fue de 280 millones de toneladas. Los plásticos de ingeniería son ampliamente utilizados por sus buenas propiedades mecánicas, resistencia a la tracción, razonable estabilidad térmica y buenas propiedades de barrera y resistencia a la abrasión (Plastic Europe, 2012, p. 6).

En la Figura 1.1 se presenta el consumo mundial de termoplásticos en el año 2011. El 8,5 % de plásticos estándar corresponde a 17 millones de toneladas de polietilentereftalato (PET) y el 5 % de plásticos de ingeniería a 1 millón de toneladas de PET, lo que demuestra una considerable demanda de este material (Plastics Europe Market Research Group, 2012, p. 9).

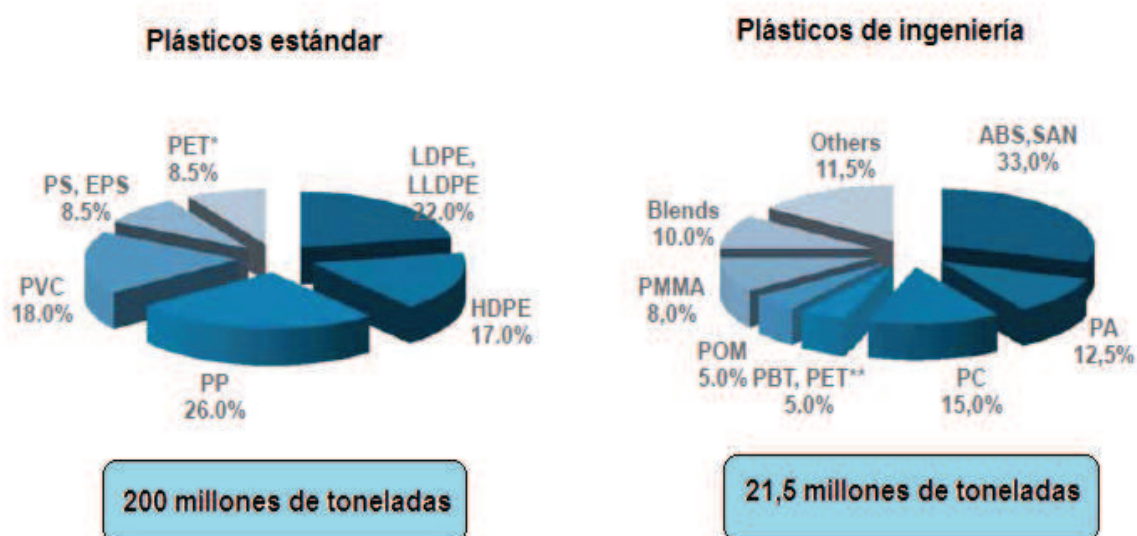


Figura 1.1. Demanda mundial de termoplásticos por tipo, 2011
(Plastics Europe Market Research Group, 2012, p. 9)

En el 2004 el consumo mundial del PET fue de alrededor de 13 millones de toneladas por año, de las cuales aproximadamente 1,5 millones de toneladas fueron destinadas a la producción de botellas (Achilias y Karayannidis, 2044, p. 385).

Los poliésteres termoplásticos fueron sintetizados por primera vez en 1929 por Carothers y Hill con el uso de ácido carboxílicos y dioles alifáticos. El PET uno de los poliésteres aromáticos más importante fue obtenido por Whinfield y Dickson en 1941. La producción comercial del PET empezó en 1953 y se lo utilizó en la producción de fibras y en los años 60 su uso se extendió a la fabricación de films y botellas para bebidas (Dumitru y Firas, 2005, p. 1454; Lepoittevin y Roger, 2011, p. 98).

El PET es uno de los plásticos de ingeniería más versátiles y presenta aplicaciones de gran acogida a nivel mundial como se indica en la Figura 1.2, el PET grado botella es uno de los mercados con mayor crecimiento, las fibras ocupan el segundo lugar y en tercer lugar están las películas (Chemsystems, 2009).

Las propiedades mecánicas del PET dependen del proceso de fabricación de la forma final que se desee el producto. El PET es usado como material de empaque de alimentos, medicamentos y productos electrónicos debido a sus buenas propiedades mecánicas.

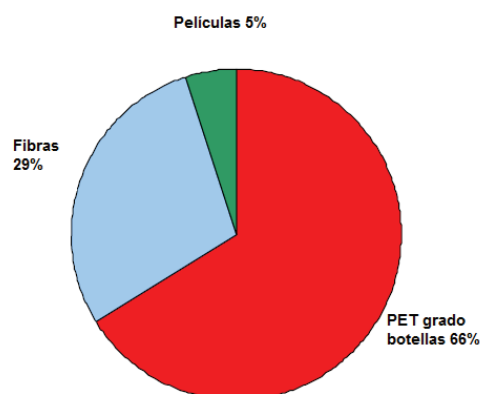


Figura 1.2. Principales aplicaciones de PET: fibras, películas y grado botella (Chemsystems, 2009)

1.1.2 ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA DEL PET

El PET es un poliéster lineal termoplástico semicristalino considerado como uno de los materiales de ingeniería más importante desde hace dos décadas por su resistencia a la tracción y resistencia al impacto, resistencia química, la claridad, procesabilidad, la capacidad de color, razonable estabilidad térmica y estabilidad a la intemperie. En la Figura 1.3 se muestra la estructura del PET (Calhoun y Peacock, 2006, p. 371).

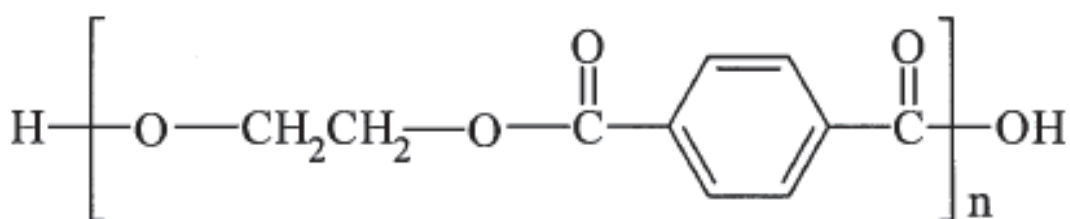


Figura 1.3. Poli (etilén tereftalato) (PET)
(Achilias y Karayannidis, 2004; p. 392)

La estructura cristalina que forma el PET es única y corresponde a una unidad triclinica. Su velocidad de cristalización es lenta debido al limitado movimiento de sus cadenas que impiden el incremento de los cristales a temperaturas mayores a 200 °C. Esta cristalización lenta da origen a zonas amorfas con alta claridad que son muy comunes en la fabricación de botellas, películas delgadas y materiales de envasado. En cuanto a la temperatura de fusión del PET se encuentra en un rango de 250 a 280 °C, mientras que la temperatura de transición vítrea está entre 60 a 90 °C y depende de la pureza, historia térmica y método de determinación (Binsack, 1996, pp. 49-50; Calhoun y Peacock, 2006, pp. 358-359; Geil, 2002, p. 133).

El anillo aromático unido a la cadena alifática corta hace que el polímero sea una molécula rígida en comparación con otros polímeros alifáticos tales como las poliolefinas (polietileno) o poliamidas (nilón), además la falta de movilidad segmentaria en las cadenas de polímero resulta en relativamente alta estabilidad térmica (Gharal, Kelkar, Labde, Nayak, Roa y Venkatachalam, 2012, p. 77).

1.1.3 OBTENCIÓN DEL PET

El PET es sintetizado en dos etapas: prepolimerización y policondensación. La etapa de prepolimerización puede ser llevada a cabo vía esterificación o transesterificación como se indica en la Figura 1.4. En la esterificación se emplean los monómeros ácidos tereftálico y etilenglicol que reaccionan a una temperatura de 240 - 260 °C y una presión entre 300 - 500 kPa (Dumitru y Firas, 2005, p. 1455; Lepoittevin y Roger, 2011, p. 100; Maréchal, 2002, p. 25).

La transesterificación es utilizada industrialmente y se emplea el dimetil tereftalato que reacciona con 1,4-butanodiol o etilenglicol a 140 - 220 °C al vacío. Para acelerar esta etapa se añade compuestos solubles de tinanio, manganeso, germanio y acetatos de plomo, zinc, calcio y cadmio en cantidades de 0,05 - 0,5 % de la masa total de reacción. El producto intermedio formado es el BHTE (bis hidroxí etilen tereftalato) (Dumitru y Firas, 2005, p. 1455; Maréchal, 2002, p. 25).

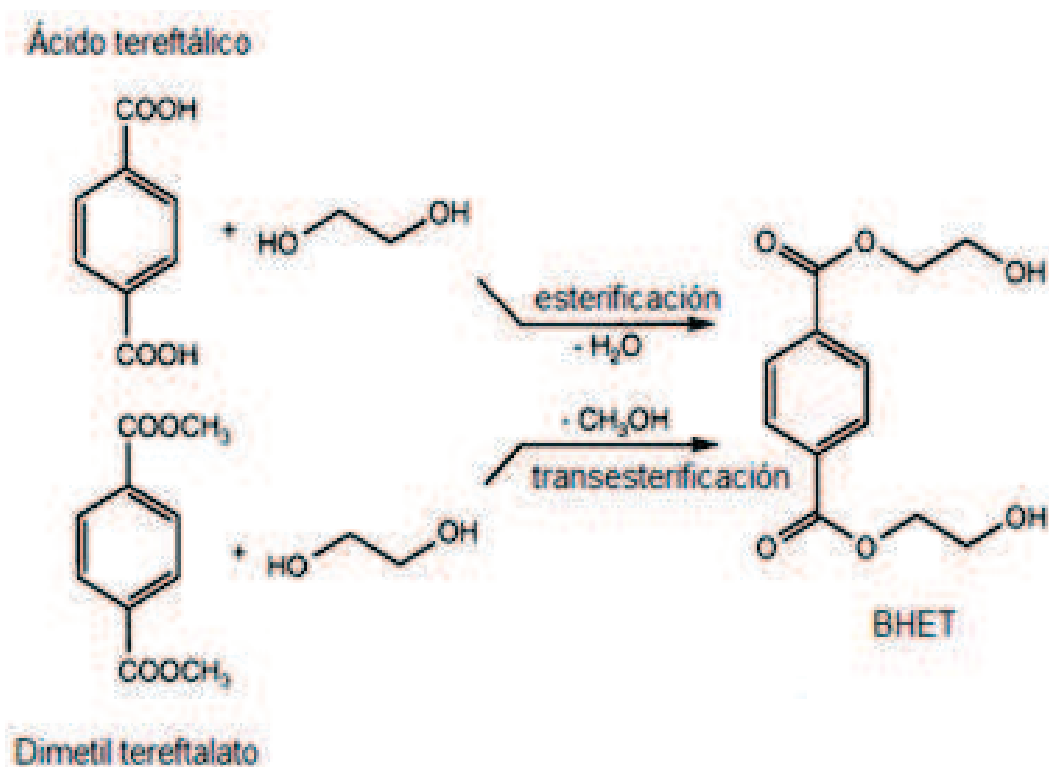


Figura 1.4. Obtención de BHTE vía esterificación y transesterificación
(Lepoittevin y Roger, 2011, p. 100)

En la etapa de policondensación, el BHTE entra en el reactor a una temperatura de 280 - 300 °C y al vacío (10 – 50 Pa) con el objetivo de aumentar la viscosidad. El PET formado en este paso es adecuado para usos que no requieren de alto peso molecular como películas. Además, se produce etilenglicol como subproducto el cual debe ser eliminado para aumentar el rendimiento de la reacción (Calhoun y Peacock, 2006, p. 355; Lepoittevin y Roger, 2011, pp.100-101).

Si se emplea ácido tereftálico se produce como subproducto agua; y, metanol si se emplea dimetil tereftalato. El agua, el metanol y exceso de etilenglicol son eliminados por destilación (Culler, Hernandez y Selke, 2000, p. 116; Maréchal, 2002, p. 25).

La polimerización en fase fundida, permite obtener PET de alto peso molecular ($> 30\,000$ g/mol) y alta viscosidad sin la necesidad de altas temperaturas que degradan el producto.

El proceso se lleva a cabo a 220 - 230 °C, esta etapa es catalizada con óxido de antimonio y germanio. Es necesario añadir compuestos de fósforo para desactivar los catalizadores y evitar la degradación (Bottenbruch, 1996, p. 8; Culler et al, 2000, p. 116; Lepoittevin y Roger, 2011, p 101; Maréchal, 2002, p. 25).

1.1.4 DEGRADACIÓN DEL PET

Las temperaturas de procesamiento del PET se encuentran entre 280 - 300 °C, lo que ocasiona degradación del polímero. Esta degradación puede ser: degradación hidrolítica, térmica y oxidativa.

La degradación del poliéster dificulta la procesabilidad e incluye en la decoloración, provoca ruptura de las cadenas resultando en polímeros de bajo peso molecular, formación de acetaldehído, enlaces cruzados o formación de gel y la formación de ojo de pez en las películas (Gharal et al, 2012, p.78).

1.1.4.1 Degradación hidrolítica

El PET tiene la capacidad de absorber agua del medio ambiente, lo que causa su hidrólisis. Este proceso tiene lugar en condiciones de humedad por encima de la temperatura de transición vítrea aunque sea a bajas velocidades.

La degradación hidrolítica tiende a ser 10 000 veces más rápido que la degradación térmica en un rango de temperatura entre 100 - 120 °C (Fairgrieve, 2009, p. 108).

La degradación hidrolítica es una reacción auto catalítica donde el agua actúa sobre los enlaces éster, provoca la ruptura de las cadenas del PET y da lugar a la formación de grupos carboxilos y alcoholes como se puede ver en la Figura 1.5, como consecuencia se tiene una reducción del peso molécula (Automatismo Industrial, 2006, p. 7; Calhoun y Peacock, 2006, pp. 357-358; Lepoittevin y Roger, 2011, pp. 106-107).

El contenido de humedad debe mantenerse por debajo del 0,02 % para evitar una pérdida rápida del peso molecular. La velocidad de la hidrólisis es directamente proporcional a la concentración de agua del polímero razón por la cual es importante el secado del PET antes de su procesamiento (Fairgrieve, 2009, p. 108).

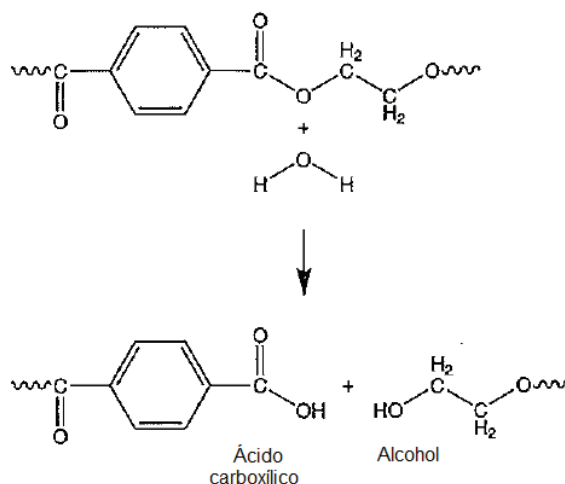


Figura 1.5. Degradación del PET mediante hidrólisis
(Calhoun y Peacock, 2006, p. 358)

1.1.4.2 Degradación térmica

La degradación térmica del PET ocurre a elevada temperatura entre 270 - 370 °C, en ausencia de oxígeno y consiste en una ruptura aleatoria de los enlaces éster que da origen a un éster de vinilo y grupos carboxilos, debido a que los grupos terminales predominantes son hidroxilo-éster se produce la transesterificación de los éster y se da lugar al alcohol de vinilo, por ello se transforma a acetaldehído como se observa en la Figura 1.6. La ruptura de las cadenas resulta en una disminución en el peso molecular (Rashid y Sarker, 2013, pp. 78-79).

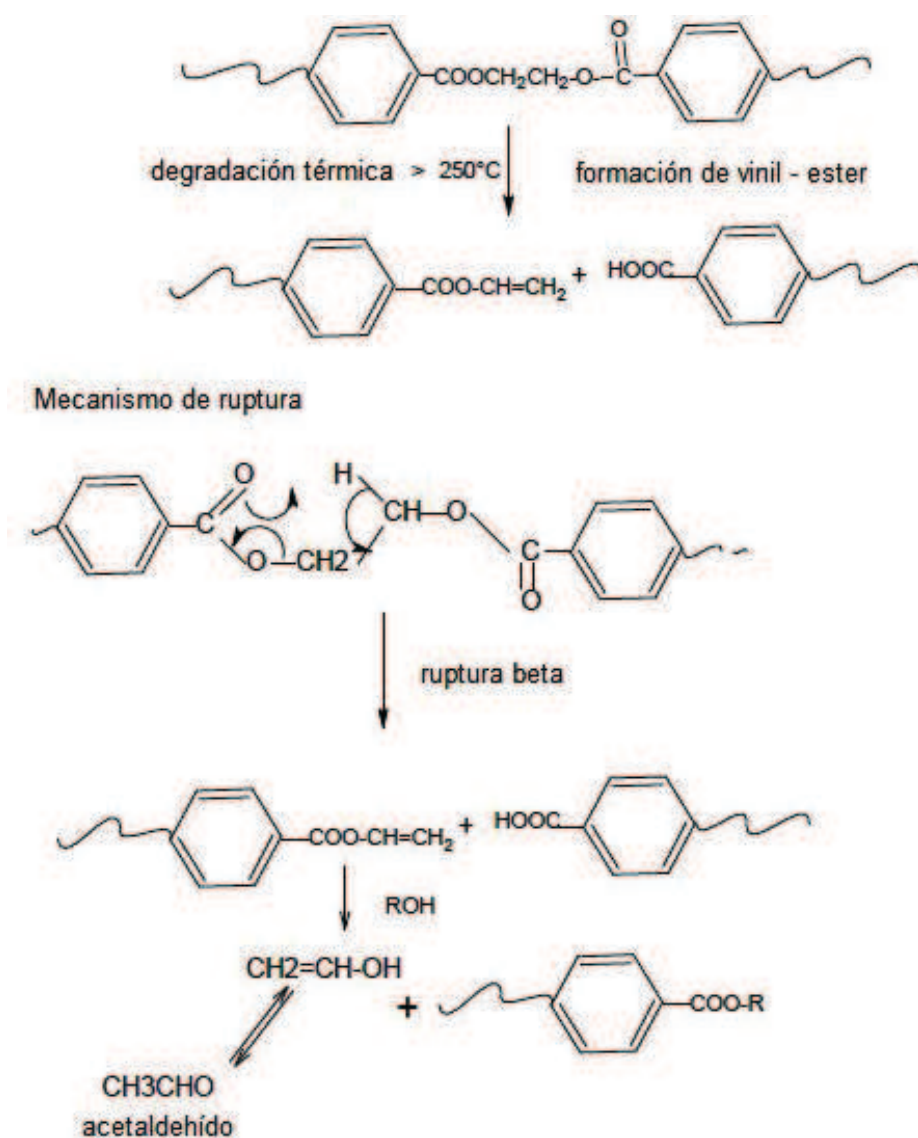


Figura 1.6. Formación de acetaldehído
(Gharal et al, 2012, p.79)

El acetaldehído se genera durante el proceso de fusión del PET, razón por la cual el nivel de aldehído se controla durante la inyección de la preforma en la fabricación de botellas, con el objetivo de obtener un producto con un contenido máximo de 2 ppm. El acetaldehído tiene un olor característico a frutas y se difunde en el contenido de la botella particularmente en el caso del agua mineral (Automatismo Industrial, 2006, p. 2).

1.1.4.3 Degradación termo-oxidativa

La degradación termo-oxidativa del PET tiene lugar a elevadas temperaturas en un rango de 150 – 250 °C en presencia del oxígeno, que provoca la rápida reacción de los radicales alquilo con el oxígeno para dar lugar a la formación de radicales peróxidos y posteriormente permiten la formación de hidroperóxidos en el grupo metileno del enlace diéster como se ve en la Figura 1.7. Se asocia la reacción con el mecanismo de radicales libres que se indica a continuación (Lepoittevin y Roger, 2011, p. 108):

Iniciación



Propagación



Ramificación



El mecanismo de reacción es muy rápido si la concentración de oxígeno en el polímero es alta, transformando rápidamente radicales alquilos en radicales peróxidos (Fairgrieve, 2009, p.66).

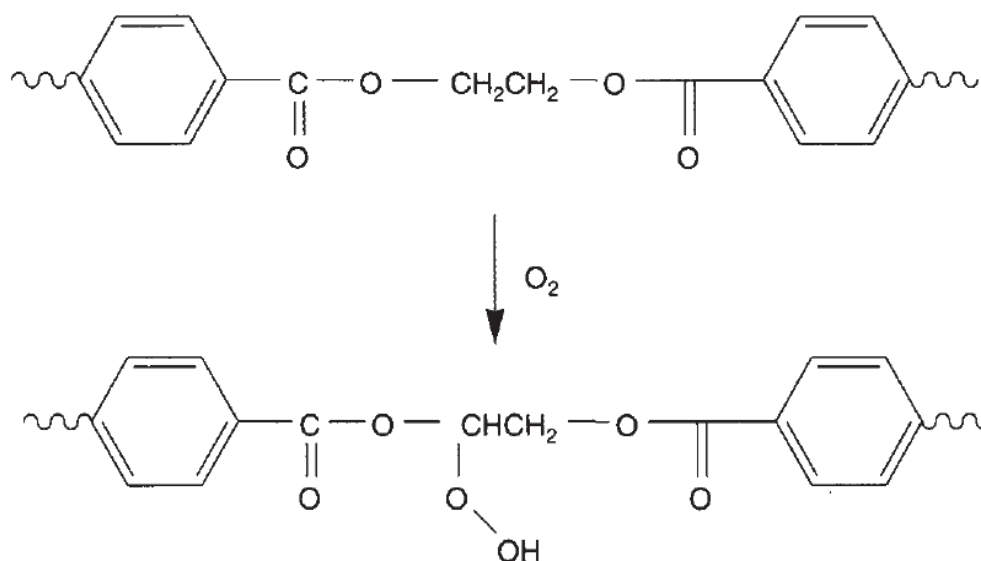


Figura 1.7. Degradación termo-oxidativa del PET
(Lepoittevin y Roger, 2011, p. 108)

1.2 RECICLAJE QUÍMICO DEL PET

La industria del reciclado del PET nace por la presión ambiental de mejorar la gestión de residuos, debido a la lenta tasa de descomposición natural del PET. El reciclaje del PET se considera la solución más económica para la reducción de desechos de PET (Dumitru y Firas, 2005, p. 1457-1458).

El reciclaje de las botellas PET empezó en la década de los setenta y es uno de los plásticos más reciclados mediante procesos químicos para obtener sus materias primas con las que se vuelven a producir envases para alimentos. Sin embargo, esta práctica decayó debido al costo final del producto reciclado más caro que el fabricado con PET virgen. En la Figura 1.8, se observa los diferentes usos que se da al PET reciclado (Culler et al, 2000, p. 388).

Entre los métodos de reciclaje, el reciclado químico cumple con los principios de desarrollo sostenible ya que conduce a la formación de las materias primas a partir del polímero, de esta manera el medio ambiente no se sobrecarga y no hay necesidad de recursos adicionales para la producción de PET. Esto es posible

gracias a que la reacción de síntesis del PET consiste en una policondensación reversible, por lo que se puede transformar de nuevo a sus unidades de monómero u oligómeros, además la depolimerización puede ser total con la obtención de sus monómeros o parcial obteniendo sus oligómeros y otros productos químicos industriales. Debido a que el PET es un poliéster con grupos funcionales de éster, puede ser tratado con algunos reactivos: agua, alcoholes, ácidos, glicoles, y aminas (Bartolone, Imran y Cho, 2012, p. 69).

Por lo expuesto, el creciente consumo mundial del PET ha obligado a buscar alternativas eficientes para tratar los desechos de PET; tal es el caso del reciclaje químico que ha llegado a ser el proceso líder ya que permite obtener los monómeros a partir de los cuales se elabora el PET.

La Tabla 1.1 se muestra los diferentes métodos de reciclaje químico del PET, los agentes de solvólisis, las principales reacciones y productos.

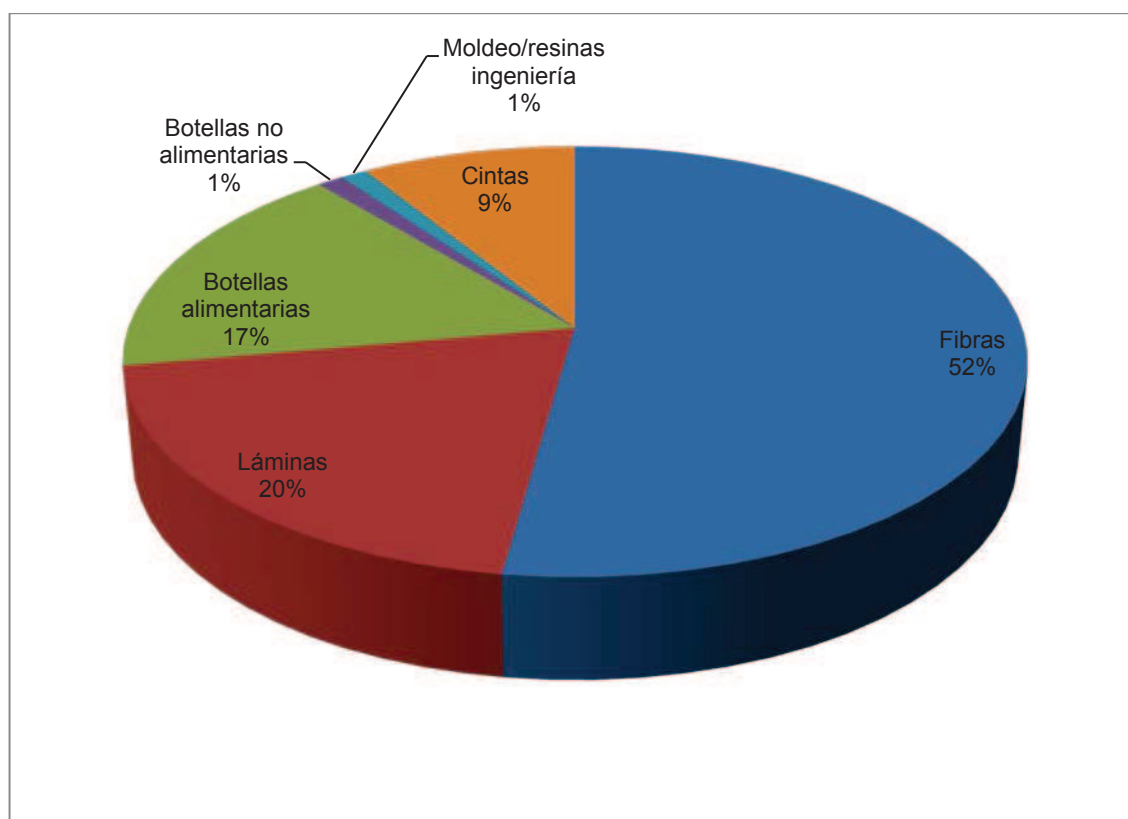
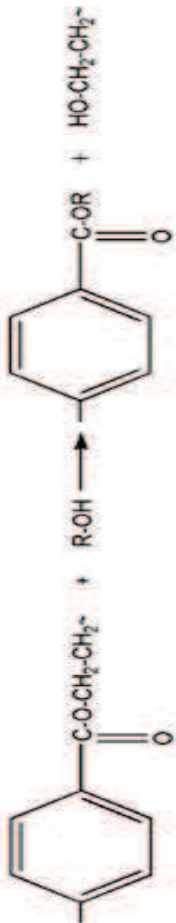
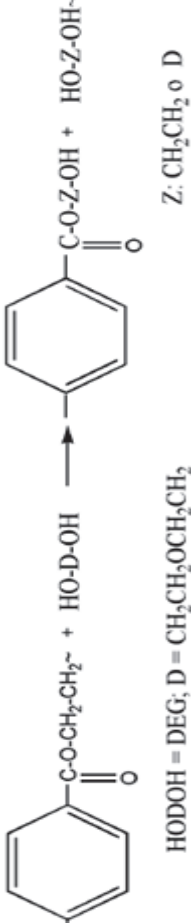
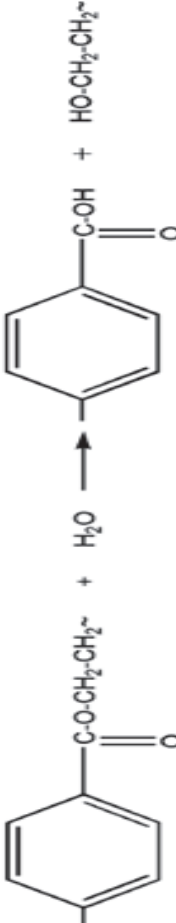
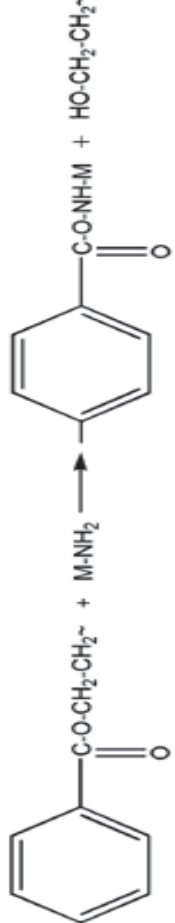


Figura 1.8. Usos para el PET reciclado
(AIMPLAS, 2008, p.5)

Tabla 1.1. Métodos de reciclaje químico: agentes solvolíticos y productos

Método	Agente de solvólisis	Principales productos	Reacción
Metanólisis	Metanol	Dimetil-tereftalato	
Glicólisis	Etilenglicol Propilenglicol Dietilenglicol	Bis(hidroxi-etilen)tereftalato Bis(4hidroxi-butil)tereftalato Etilenglicol	
Hidrólisis	Agua: neutra, básica, ácida	Ácido tereftálico Etilenglicol	
Aminólisis	Aminas Poliaminas	Ácido tereftálico Etilenglicol	

(Jankauskaite et al, 2008, p. 124; Spsychaj, 2002, p. 1252)

1.2.1 GLICÓLISIS

La depolimerización del PET mediante una glicólisis es el proceso de transesterificación entre el grupo éster del PET y un diol, comúnmente se emplea: etilenglicol, dietilenglicol, butanodiol, trietilenglicol y propilenglicol en exceso, a presión atmosférica o a altas presiones y temperaturas elevadas (180 – 250 °C).

Se produce la ruptura de los enlaces éster que son reemplazados por terminales hidroxilos, en presencia de un catalizador que puede ser acetatos de zinc, manganeso, cobalto, plomo, sodio, calcio y sales metálicas del ácido acético, durante un tiempo de 0,5 a 8 horas dependiendo del glicol utilizado (Achilias y Karayannidis, 2004, p. 387; Spychaj, 2002, p. 1259; Vitkauskienė y Makuška, 2008, p. 31)

La reacción de glicólisis puede llevarse a cabo en un balón de tres bocas, equipado con un condensador, motor de agitación y suministro de un gas inerte para favorecer a la reacción eliminando el oxígeno como se muestra en la Figura 1.9 (Jeong, Kim, Kim, Lee, Moon, Son, 2007, p.1076).

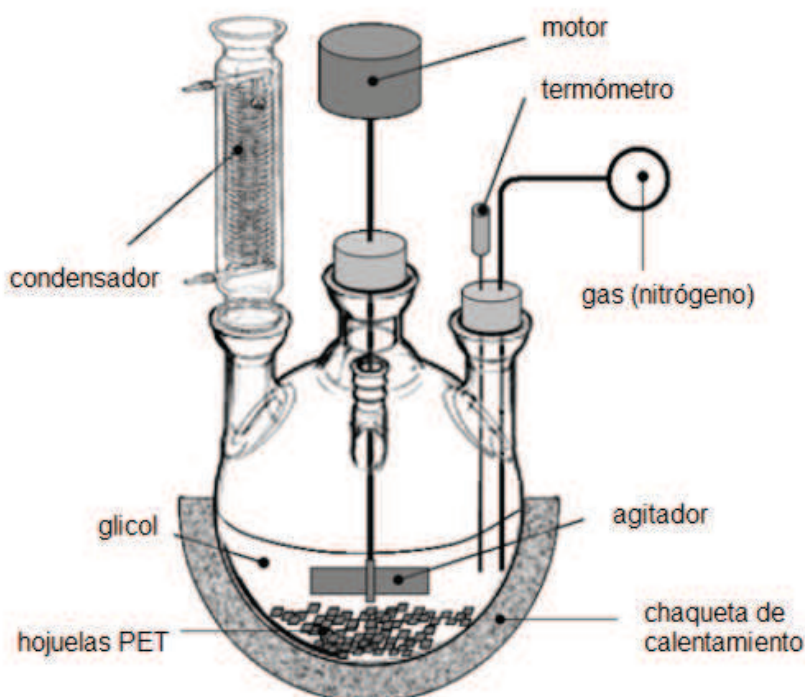


Figura 1.9. Esquema del reactor para glicólisis del PET
(Jeong et al, 2007, p.1077)

Los principales productos que se obtienen son el BHTE (bis hidroxí etilen tereftalato) y oligómeros de bajo peso molecular, de acuerdo con la reacción que se puede observar en la Figura 1.10, productos que son materia prima para la elaboración de resinas poliéster insaturadas, espumas rígidas de poliuretano polisocianurato (Araiza, Bringas, Castaño y Flores, 2000, p. 218; Hernández y Orjuela, 2004, p.16).

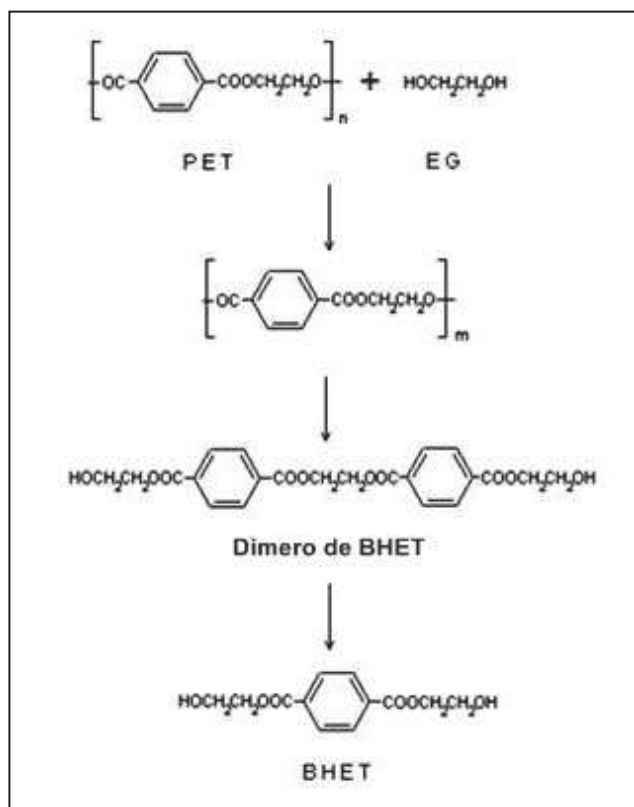


Figura 1.10. Reacción de glicólisis del PET
(Estrada y Herrera, 2012)

La selección y concentración del catalizador, tiempo, temperatura y concentración del glicol son factores que influyen el glicólisis del PET (Jankauskaite, Macijauskas y Lygaitis, 2008, p. 123).

Maldonado et al. (2001) determinó la influencia de la selección del catalizador, para lo cual colocó en un matraz 4,0 g de gránulos de PET; 2,8 g de trietilenglicol y 0,04 de catalizador. La reacción se realizó en un intervalo de temperatura de 170 a 180 °C durante dos horas. Los catalizadores que se emplearon fueron

acetato de plomo que logró obtener un 94,5 % e hidróxido de litio que permitió obtener un 86 % de PET depolimerizado (p.42).

La influencia de la concentración del catalizador se determinó en una glicólisis con etilenglicol (EG), la reacción se llevó a cabo a 190 °C durante 1 hora y se concluyó que al incrementar la cantidad de catalizador también se incrementa el rendimiento de la reacción; así para 0,006 mol de acetato de cobalto se alcanzó 88,6 % de PET depolimerizado (Chen, Chen, Liao, Lo y Mao, 2001, pp. 945-946).

Con respecto a la temperatura se realizó una glicólisis con 0,002 moles de acetato de cobalto durante 1 hora. La máxima conversión fue de 85,7 % a 110 °C Con referencia al glicol, una relación molar EG/PET de 4:1 además de aumentar la velocidad de reacción, disminuye la formación de indeseables oligómeros de alto peso molecular (Nadkarni, 2002, p.1240).

Estrada y Herrera (2012) demostraron que la depolimerización del PET mediante glicólisis es la mejor alternativa para reciclar PET post-consumo de diferente naturaleza y características. Además, comprobó que al incrementar la relación molar EG/PET, la temperatura y la concentración del catalizador, incrementa el rendimiento del BHET de alta pureza (p. 128).

Estudios de depolimerización de PET con propilenglicol realizados por Chaeichian et al (2008) demostraron que la síntesis de resina poliéster insaturada a partir del producto de la glicólisis que se realizó en presencia de un nuevo catalizar (acetato de zinc más ciclohexil amina) resultó más rápida que una formulación con el producto que se obtuvo de una glicólisis convencional solo en presencia acetato de zinc (p. 187).

En los últimos años, se ha desarrollado nuevos método de glicólisis de PET. Uno de ellos es la glicólisis en xileno que permite obtener una alta pureza de los productos, mejor agitación y menor tiempo de reacción. La irradiación microonda es otro método eficiente que permite la degradación completa del PET con glicoles en pocos minutos (Spychaj, 2002, p. 1260).

1.2.2 HIDRÓLISIS

Los estudios de hidrólisis del PET han sido de gran importancia en el tratamiento de desechos de PET ya que permite obtener directamente ácido tereftálico (AT) en una sola reacción. La hidrólisis del PET se lleva a cabo en soluciones acuosas ácidas, básicas y neutras.

1.2.2.1 Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida se realiza con ácidos inorgánicos fuertes entre los cuales están: ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido fosfórico en un intervalo de pH de 2 a 6. Al utilizar ácido sulfúrico concentrado ($>14,5$ M) se evita las altas temperaturas y presiones, además se depolimeriza más del 90 % del PET en tiempos cortos (<1 h). Con ácidos diluidos (<10 M) es necesario aumentar la presión y temperaturas (150 °C), el tiempo aumentará aproximadamente a 5 h (Achilias y Karayannidis, 2004, p. 388; Nadkarni, 2002, p.1238).

Se requiere de procesos de separación y purificación para la obtención de ácido tereftálico del 99 % de pureza. La mezcla de reacción que se obtienen (liquida viscosa) es neutralizada con una solución de hidróxido de sodio con el objetivo de subir el pH (7 - 8,5). Una vez enfriada la mezcla se añade una base para obtener un pH de 11, se obtiene ácido tereftálico en forma de sal de sodio soluble en agua. Además se tiene otras impurezas: sulfato de sodio, hidróxido de sodio, sulfato de sodio y etilenglicol, los cuales son filtrados. Finalmente se añade ácido para que el ácido tereftálico precipite. El etilenglicol se recupera con solventes orgánicos tal el caso de tricloroetileno (Hernandez y Orjuela, 2004, p. 16; Spychaj, 2002, p. 1267).

En un estudio de hidrólisis del PET con ácido sulfúrico (10 N) en presencia de 2,5 N ácido fosfórico, como describe la reacción de la Figura 1.11, realizado en un reactor con reflujo y agitación mecánica a 1 atmósfera de presión y un rango de temperatura de $88 - 140$ °C, permitió determinar (Mishra, Goje y Zope, 2007, p.):

- La cantidad de PET que reacciona se incrementa al aumentar la temperatura de reacción.
- Al incrementar la concentración del ácido, aumenta el porcentaje de PET que reacciona.
- El tamaño de partícula juega un papel importante y mientras más pequeño sea el PET, mayor será el porcentaje de PET que reacciona.

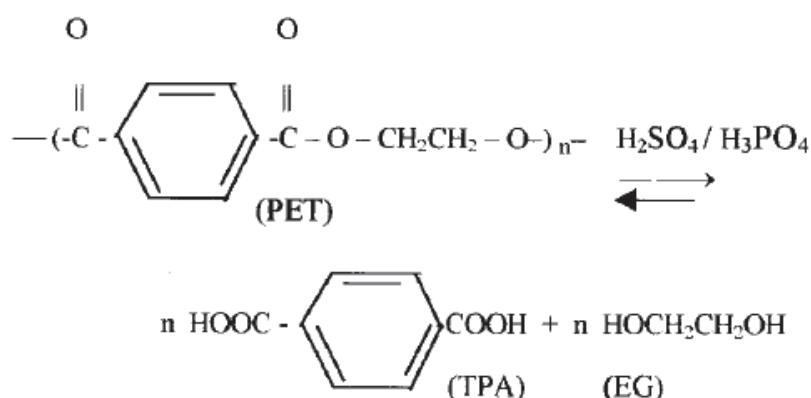


Figura 1.11. Reacción de hidrólisis ácida del PET
(Mishra et al, 2007, p. 585)

La hidrólisis ácida del PET no es utilizada comúnmente a nivel industrial debido al gran consumo de ácidos, que trae como consecuencia problemas de efluentes. Además, es necesario invertir en materiales resistentes a la corrosión.

1.2.2.2 Hidrólisis Alcalina

La hidrólisis alcalina se realiza comúnmente en una solución acuosa de hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o hidróxido de amonio con concentraciones de 4 a 20 %. Se trata de una reacción lenta, el proceso puede durar entre 3 – 5 h a 210 - 250 °C y una presión de 1.4 - 2 MPa. Al utilizar hidróxido de amonio se logra eliminar las impurezas presentes en las botellas de PET, sin embargo su costo es mayor en comparación al hidróxido de sodio, adicionalmente se ha demostrado que la hidrólisis alcalina con KOH presenta mejora actividad en la depolimerización de PET en comparación al NaOH. La reacción es acelerada con

la adición de catalizadores como las aminas (ciclohexilamina) (Achilias y Karayannidis, 2004, p. 389; Spsychaj, 2002, p. 1268).

En la Figura 1.12, se observa la reacción de hidrólisis alcalina del PET y sus productos principales productos, etilenglicol y disodio tereftalato (TPA- Na_2). El ácido tereftálico puro se obtiene mediante una neutralización de la mezcla de reacción con ácido fuerte que puede ser ácido clorhídrico menos peligroso ya que con el ácido sulfúrico existe la opción de carbonizar los monomeros del ácido tereftálico (Spaseska y Civkaroska, 2010,p.).

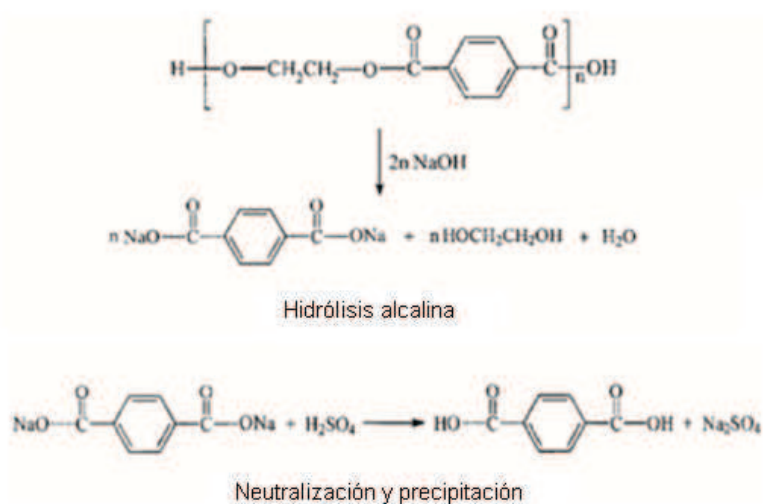


Figura 1.12. Reacción de hidrólisis alcalina del PET
(Spaseska y Civkaroska, 2010, p.382)

Mishra y Goje (2007), estudiaron el efecto de la temperatura de reacción, concentración de NaOH y tamaño de la partícula en la hidrólisis alcalina del PET con hidróxido de sodio y determinaron (p. 973, 974, 975):

- La cantidad de PET que reacciona se incrementa al aumentar la temperatura de reacción, siendo mayor a 150 °C.
- Al incrementar la concentración del NaOH, aumenta el porcentaje de PET que reacciona.
- El porcentaje de PET que reacciona disminuye con el aumento del tamaño de partícula.

Una de las ventajas de la hidrólisis alcalina es el tratamiento de PET contaminado con impurezas incluso impurezas metálicas, además, el proceso es simple y menos costoso que la metanólisis (Achilias y Karayannidis, 2004, p.389; Spychaj, 2002, p. 1268).

1.2.2.3 Hidrólisis neutra

La hidrólisis neutra se lleva a cabo en agua o vapor de agua a elevadas temperaturas en un rango de 200 – 300 °C y presiones de 1 - 4 MPa, con una relación molar PET/agua entre 1:2 - 1:12. Se recomienda el uso de catalizadores como acetatos alcalinos. Los productos que se obtiene son ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (Spychaj, 2002, p. 1272).

La hidrólisis neutra presenta ventajas sobre la hidrólisis ácida y básica al no formar sales difíciles de tratar, por tanto, es una alternativa amigable con el medio ambiente y no genera problemas de corrosión. Sin embargo los productos obtenidos son considerados de menor pureza que en la hidrólisis ácida y alcalina (Achilias y Karayannidis, 2004, p. 389).

1.2.3 METANÓLISIS

La metanólisis se realiza con metanol a altas temperaturas entre 180 - 280 °C y presiones 2 - 4 MPa durante 3 - 5 h. Los principales productos obtenidos son dimetil tereftalato (DMT) y etilenglicol, como se observa en la Figura 1.13. El DMT es purificado por destilación. Generalmente se emplea catalizadores de acetato de zinc, magnesio o cobalto, que deben ser desactivados una vez completada la reacción para evitar la transesterificación del DMT con el EG (Spychaj, 2002, p.1256).

Fusheng et al. (2009) estudiaron la metanólisis utilizando un líquido iónico como solvente a una temperatura de 160 °C durante 3 h. y acetato de zinc como

catalizador, alcanzando 100 % conversión de PET y más del 88% recuperación del DMT (p. 272).

Una de las ventajas de este proceso es que el DMT que se produce es de las mismas cualidades que el DMT puro, por tanto puede ser empleado en la producción de PET. El etilenglicol y metanol son fácilmente reciclados. La separación y refinado de los productos presentes en la mezcla de reacción constituye una de las desventajas de este método, debido a su elevado costo. El proceso está conformado por varias operaciones unitarias: filtración, cristalización, destilación al vacío. Incluso, convertir DMT en TPA representa otra gran inversión para el proceso de producción de PET (Nadkarni, 2002, p. 1236).

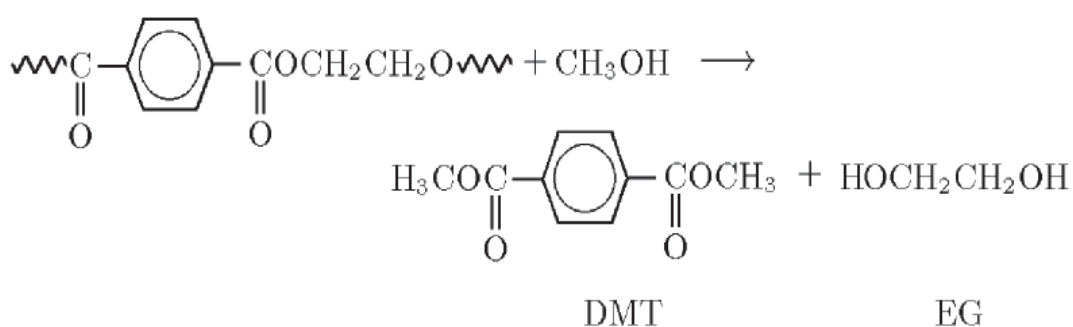


Figura 1.13. Reacción de metanólisis del PET
(Spychaj, 2002, p.1256)

1.2.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL PRODUCTO DE LA DEPOLIMERIZACIÓN DEL PET

1.2.4.1 Espectroscopía de infrarrojo (FTIR)

La espectroscopía de Infrarrojo (FTIR) es una de las técnicas de análisis más versátiles, se basa en la interacción de la materia con la radiación y utiliza la región del espectro magnético. La FTIR permite la identificación de los grupos funcionales de un compuesto y es de gran aplicación en la caracterización e identificación de productos farmacéuticos, análisis de contaminantes, biomedicina, agricultura, polímeros, alimentación, entre otros (Stuart, 2004, p. 2).

El análisis FTIR se basa en la absorción de la radiación infrarroja en longitudes de onda determinadas, tiene lugar en la región del infrarrojo medio con una longitud de onda entre los $4\,000$ a 400 cm^{-1} como se observa en la Figura 1.19. La radiación infrarroja interactúa con la materia y se produce un cambio en su estado energético lo que ocasiona una vibración a ciertas frecuencias de los enlaces. 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, Stuart, 2004, p. 2).

Existen técnicas de análisis por espectroscopía infrarroja: Análisis por transmisión y análisis por reflectancia total atenuada (ATR).

El análisis por transmisión es el método infrarrojo más antiguo y más sencillo por el cual es posible analizar muestras en las formas líquidas, sólidas o gaseosas. En el caso de los polímeros se requiere que la muestra sea reducida a películas muy delgadas de modo que pueda penetrar y traspasar fácilmente el haz de luz.

La reflectancia total atenuada se basa en el fenómeno de la reflexión total interna, en la Figura 1.14 se indica como un haz de luz de radiación infrarroja entra a un cristal transmisor de alto índice de refracción que permite la reflexión interna total si el ángulo de incidencia es mayor que el de la muestra y crea una onda sobre la superficie de dicho cristal, la onda se extiende a la muestra y se registra en el espectro (Stuart, 2004, p. 33).

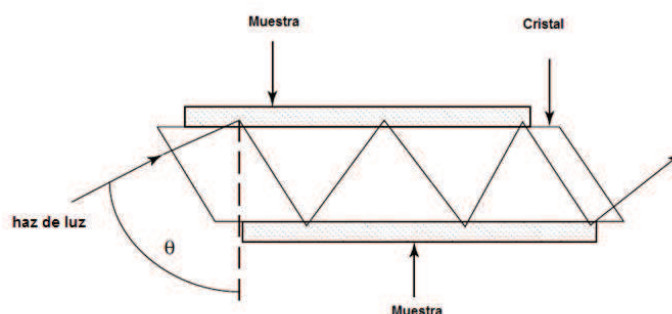


Figura 1.14. Principio de reflectancia total atenuada
(Stuart, 2004, p. 34)

1.2.4.2 Resonancia magnética nuclear (RMN)

La resonancia magnética nuclear es una técnica que permite obtener información estructural sobre las moléculas. En el análisis de polímeros su aporte se basa en estudios de las configuraciones de cadena y microestructura. Se fundamenta en la propiedad mecánica de los núcleos atómicos conocida como espín. Los espines de los núcleos magnéticos se orientaran de manera al azar, pero al ser expuestos a un campo magnéticos, se orientan de forma específica (Lambert y Mazzola, 2004, p. 2).

Los núcleos atómicos son sometidos a la radiación electromagnética en el rango de radiofrecuencias y sufren un cambio energético. El carbono y el hidrógeno por ser elementos más frecuentes en la materia han sido muy estudiados, para que un núcleo emita una señal de resonancia magnética debe tener un número impar de protones o neutrones o ambos y tanto como ^1H como el ^{13}C cumplen con esta condición (Stermitz y Weininger, 1988, pp. 323-326).

1.2.4.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido DSC es una de las técnicas más usada para la caracterización térmica de los materiales que permite determinar la temperatura de fusión, transición vítrea, grado de cristalinidad, reacción cinética o estabilidad de la oxidación. Esto es posible con la medición de la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia cuando es sometida a un cambio físico o químico, a temperatura constante durante un tiempo determinado o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante en un intervalo de temperatura (Baro, Bordas, Clavaguera, Clavaguera y Suriñach, 1992, p. 11; Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p.1).

A presión constante el cambio de energía corresponde a la entalpía, los procesos endotérmicos que incrementa la entalpía son: fusión, evaporación y temperatura de transición y los procesos exotérmicos que la disminuyen son: cristalización, los

procesos curado y la descomposición (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p.1).

Los termogramas o curva DSC es la representación gráfica del proceso de medición. En la Figura 1.15 se observa las transiciones térmicas que se determinan en el análisis DSC de un polímero: Transición vítrea (T_g), fusión y calor de fusión y cristalización.

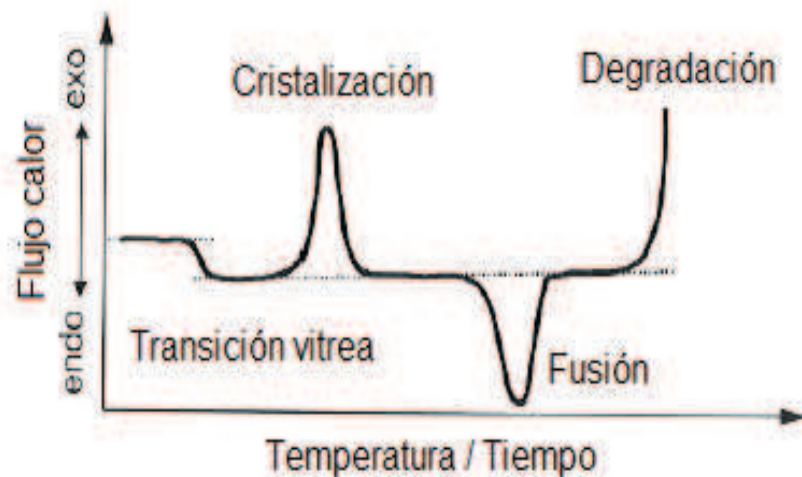


Figura 1.15. Termograma de un polímero con sus transiciones térmicas (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p.1)

Transición vítrea (T_g): La temperatura de transición vítrea (T_g) en polímeros amorfos o semicristalinos corresponde al cambio de un estado rígido y frágil a un estado flexible. A temperaturas mayores a la T_g , los movimientos de segmentos de las cadenas poliméricas se incrementan y ocurren cambios en la capacidad calorífica y en el volumen (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, p.7; Baro et al, 1992, p. 12).

Fusión y calor de fusión: En la fusión ocurre un cambio de 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 amplio de temperatura (Ehrenstein, Riedel y Trawiel, 2004, pp. 10-12).

Cristalización: Corresponde al proceso de enfriamiento sucesivo de un polímero después ser fundido, con un cambio en la entalpía que se produce cuando el material en estado de líquido amorfo se transforma en un sólido cristalino. Por encima de la T_g , las cadenas del polímero aumentan su movilidad y dan lugar a estructuras cristalinas, termodinámicamente más estables.

La cristalización en frío se define como la cristalización durante el calentamiento de un material a una temperatura por debajo de su T_g . Mientras que la cristalización fundida se refiere cuando el material cristaliza por debajo de su temperatura de fusión y por encima de su transición vítrea durante el enfriamiento (Ehrenstein et al., 2004, p. 16; Mano, 2003, p. 162).

1.3 RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS

1.3.1 GENERALIDADES

Las resinas poliéster insaturadas son líquidos viscosos resultado de la policondensación entre ácidos insaturados y saturados con un diol, pueden ser fabricadas a partir el PET virgen o con productos de PET reciclado. Al curar las resinas se vuelven sólidos termoestables con aplicaciones comerciales de gran acogida a nivel mundial en el mercado debido a su versatilidad.

Las resinas poliéster insaturadas son ampliamente conocidas y utilizadas en la industria del plástico reforzado, en la fabricación de botones, producción de mármol sintético, productos para el transporte y aplicaciones marinas para las cubiertas de los barcos. Además se utiliza en la construcción, revestimientos y acabados como lacas, cementos y pegamentos (Czub, Penczek y Pielichowski, 2005, p. 5; Weatherhead, 1980, p.140).

Se pueden utilizar como resina pura o con materiales de relleno y reforzado, uno de los primeros usos fue producir piezas fundidas como mangos de cuchillos y mangos de paraguas. Las resinas puras pueden utilizarse en la fabricación de

piezas decorativas. Con una formulación de curado fotosensible se consigue revestimientos de muebles. Otra aplicación importante es el hormigón de poliéster compuesto por arena de sílice y aglutinante, este producto resiste más a productos químicos que el hormigón convencional. Los materiales reforzados son empleados para la manufactura de sanitarios, tubos y paneles (Fink y Leoben, 2013, p. 31-32).

1.3.2 ESTRUCTURA DE RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS

Las resinas poliéster insaturadas son productos de condensación lineal que contienen enlaces carbono-carbono. La composición química de las resinas influye directamente en las propiedades finales del producto. Las resinas están conformadas por ácidos/anhidridos saturados, insaturados y glicoles (Fontan y Guzman, 2000, p. 99).

1.3.2.1 Efecto del glicol en las propiedades de la resina

Con respecto a los glicoles, existen varias opciones: etilenglicol, propilenglicol, dietilenglicol, trimetiletilenglicol, dipropilenlicol, trietilenglicol, tetraetilenglicol, 1,2-butanodiol y 1,4-butanodiol (Müller, 1996, p. 82).

Las características y propiedades del producto final como la rigidez, tensión, flexión, resistencia al impacto, temperatura de distorsión depende de la estructura química de los diferentes glicoles empleados en la síntesis de resinas.

El glicol más utilizado para la formación de las resinas es el propilenglicol por su bajo precio, contribuye a la resina con buenas propiedades mecánicas y tiene mayor compatibilidad con estireno. La dureza se incrementa al incrementar la cantidad de propilenglicol. El etilenglicol es menos compatible con el estireno (Weatherhead, 1980, p. 142).

Dietilenglicol y trietilenglicol registran los más altos valores de resistencia a la tensión y flexión en comparación al propilenglicol. El grupo éter que forma parte de su estructura proporciona mayor flexibilidad, ya que a mayor número de enlaces éter menor será la dureza y por lo expuesto los poliésteres curados serán más flexibles y tendrán mayor resistencia al impacto. Pero presentan características poco deseables como son mayor absorción de agua, menores propiedades eléctricas y debido al oxígeno del grupo éter se disminuye la temperatura de distorsión (límite de temperatura en el que la resina empieza a perder rigidez), los grupos metilos producen altas temperaturas de distorsión. (Fontan y Guzman, 2000, p. 102).

En la Tabla 1.2 se indican las temperaturas de distorsión generadas por diferentes glicoles

Tabla 1.2. Efecto del glicol sobre la temperatura de distorsión

Glicol	Temperatura de distorsión (°C)
2,3 Butanodiol	81
Propilenglicol	73
1,3-butanodiol	62
1,4-butanodiol	59
Dipropilenglicol	< T ambiente
Dietilenglicol	< T ambiente

(Fontan y Guzman, 2000, p. 102)

Resinas elaboradas con neopentilglicol se caracteriza por tener una mayor resistencia térmica y química, en especial a álcalis, resistencia al impacto y a la flexión. Se ha determinado que formulaciones con neopentilglicol, ácido isoftálico y catalizadores de fósforo, reducen el tiempo de esterificación y se obtienen productos de color claro; sin embargo, para un buen desempeño el glicol debe ser mezclado con otros para mejorar la compatibilidad con el estireno (Czub et al., 2005, p. 17; Weatherhead, 1980, p. 142).

Para tener una resina con menor flexibilidad, mayor dureza, rigidez y resistencia química y térmica se emplean junto con los glicoles, estructuras cíclicas y aromáticas como el ciclohexanodimetanol y alcoholes modificados del bisfenol A (Fontan y Guzman, 2000, p. 102).

1.3.2.2 Efecto de los ácidos en las propiedades de la resina

Propiedades de la resina curada como la dureza, resistencia a la tensión, módulo de flexión, resistencia al impacto, temperatura de distorsión dependen de la estructura química de los ácidos saturados e insaturados.

La insaturación de los ácidos dibásicos juegan un papel importante en el curado de la resina, una mayor proporción de insaturación favorece a la reactividad y por tanto al proceso de reticulación. El ácido insaturado permite que se dé el entrecruzamiento de las cadenas; entonces cuanto mayor sea la proporción mayor es el grado de reticulación. La insaturación no debe ser aromática para que exista el entrecruzamiento (Weatherhead, 1980, pp. 142-143).

Los anhídridos insaturados utilizados a nivel industrial son: anhídrido maléico y fumárico, siendo el anhídrido maléico la mejor opción gracias a su bajo precio y mayor rendimiento en la policondensación al generar una molécula de agua por mol. El anhídrido fumárico es más costo y durante la condensación genera 2 moles de agua que deben ser removidas.

El ácido itaconico es añadido para obtener una resina curada más suave, debido al impedimento estérico que presenta. Los anhídridos son preferidos ante los ácidos por su mayor reactividad (Fink y Leoben, 2013, p. 2; Fontan y Guzman, 2000, p. 100).

Entre los ácidos y anhídridos saturados más comunes están: anhídrido ftálico, anhídrido tetrahidroftálico, ácido isoftálico y ácidos alifáticos como el ácido adípico, succínico y sebácico (Müller, 1996, 82).

El anhídrido ftálico es el más usado, proporciona rigidez y resistencia química a la resina curada. El ácido isoftálico produce plásticos reticulados más resistentes que presentan alta temperatura de distorsión, mayores módulos de flexión y mayor rigidez de la resina curada. Estas resinas son más viscosas y deben ser diluidas en mayor cantidad de estireno, lo cual aumenta la resistencia al álcali y agua. El ácido adípico y en muy pocas veces el ácido sebácico se emplean para obtener resinas más flexibles (Brydson, 2000, pp. 698-699; Nava, 2004, p.41).

Resinas obtenidas a partir de ácido tereftálico presentan gran regularidad estructural debido a las unidades de tereftalato en la cadena polimérica. Esto genera alta temperatura de distorsión, alta rigidez y gran resistencia a la corrosión química. Por otro lado, el uso de anhídrido tetrahidroftálico permite un mejor secado de la resina al aire sin la adición de compuestos parafinados, mejora las propiedades mecánicas, disminuye la absorción de agua y proporciona mayor transparencia (Fontan y Guzman, 2000, p. 101).

Propiedades físicas de las resinas como el esfuerzo a la tensión aumentan con el incremento del grado de insaturación, resinas alifáticas requieren mayor saturación para alcanzar el valor máximo de esfuerzo a la tensión. El ácido isoftálico confiere mayor esfuerzo a la tensión que el ácido ftálico, en cuanto a esfuerzos de compresión, ácidos alifáticos registran bajos valores; los productos que contienen fumaratos tienen valores más altos que aquellos que contienen maleatos y productos isoftálicos disponen de valores más altos que productos ftalatos.

Con respecto a la resistencia al impacto las cadenas largas de los ácidos alifáticos harán que los valores del esfuerzo al impacto aumente, en comparación al ácido ftálico e isoftálico. La temperatura de distorsión es mayor en productos con ácido isoftálico que con ftálicos y estos a su vez mayor que con ácidos alifáticos (Boeing, 1969, pp. 145-153).

En la Tabla 1.3 se muestran las temperaturas de distorsión que presentan las resinas poliéster insaturadas sintetizadas con diferentes ácidos.

Tabla 1.3. Efecto del ácido saturado sobre la temperatura de distorsión

Ácido saturado	Temperatura de distorsión (°C)
Isoftálico	82
Ftálico	73
Glutárico	65
Succínico	62
Adípico	55
Sebásico	<20

(Fontan y Guzman, 2000, p. 101)

1.3.2.3 Efecto de los monómeros

Los monómeros vinílicos actúan como solventes del poliéster insaturado para conseguir una viscosidad más fácil de manipular y permite el entrecruzamiento de las cadenas del poliéster para conseguir una estructura termoestable (Weatherhead, 1980, p. 144).

Entre los monómeros vinílicos está el estireno, α -metilestireno, viniltolueno, divinilbenceno, acetato de vinilo. El más usado es el estireno por su fácil disponibilidad, bajo costo y ofrece una variada gama de aplicaciones al producto final. Al aumentar la cantidad de estireno se incrementa la rigidez del producto final curado. Otro monómero utilizado es el α -metilestireno que incrementa la temperatura de torsión, dureza, resistencia a la tracción y módulo de flexión, son más flexibles y presentan menor contracción el curado pero forma menos radicales reactivos, por tanto la reacción de curado es más lenta. (Fink y Leoben, 2013, p. 4)

Los monómeros acrílicos como el metacrilato de metilo y acrilato de metilo son empleados para laminados reforzados con fibra de vidrio, imparten mayor luminosidad y mejor resistencia al medio externo. Monómeros halogenados como el dicloro-estireno y dibromo-estireno reducen la inflamabilidad en un grado limitado, pero su uso es limitado debido a los altos precios. Los éteres vinílicos

también son utilizados como monómeros, el divinil éter se emplean especialmente aplicaciones de curado por radiación (Fink y Leoben, 2013, p. 4; Fontan y Guzman, 2000, p. 103, Weatherhead, 1980, p. 147).

1.3.2.4 Inhibidores

Los inhibidores son compuestos que detienen la reacción de polimerización por completo. Los dobles enlaces de las resinas poliéster insaturadas son sensibles a las impurezas y existe mayor riesgo de una polimerización prematura a la temperatura ambiente en la que son almacenadas, mientras más alta sea esta temperatura o el tiempo de almacenamiento. Los inhibidores incrementan el tiempo de almacenamiento y tiempo de vida útil del poliéster insaturado. Algunos de estos compuestos son la hidroquinona, catecol, metibenzoquinona, son utilizados entre 100 - 300 ppm (Fink y Leoben, 2013, 9; Malik, Choudhary y Varma, 2000; 2000, p. 6).

1.3.3 SÍNTESIS DE RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS

Las resinas poliéster insaturados son productos de la reacción de condensación entre los ácidos / anhídrido saturados, ácidos / anhídrido insaturados y alcoholes divalentes, tal como se muestra en la Figura 1.16. Los compuestos más utilizados en la formulación de la resinas son el ácido ftálico, ácido maléico y propilenglicol, con una relación molar de grupo hidroxilo a grupos carbonilo de 1,1:1 (Abu, Ahma y Ramli, 2006, p. 23 ;Öztürk y Güçlü, 2007, p. 1541).

La síntesis consiste en dos etapas, la primera es la formación de un monoéster en un rango de temperatura de 60 - 130 °C, la segunda en la polimerización que se da a más de 160 °C. Suele añadirse un 5 – 10 % exceso del glicol para compensar la pérdida durante la policondensación. Los catalizadores más utilizados son el acetato de zinc y ácido *p*-toluenosulfónico (Malik et al, 2000, p. 143).

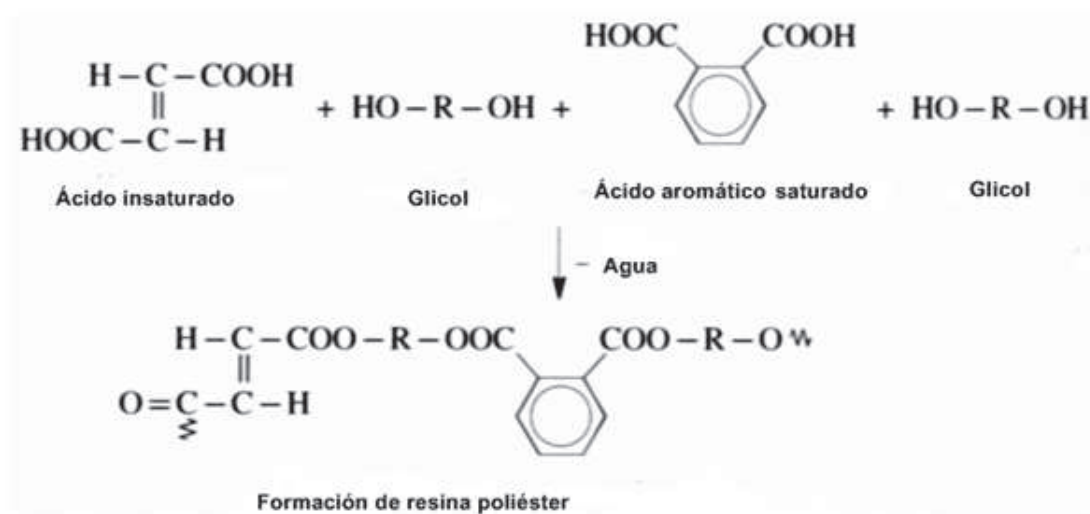


Figura 1.16. Reacción de formación resina poliéster insaturada
(Müller, 1996, p. 82)

Existen varios métodos para eliminar el agua formada durante la policondensación uno de ellos es mediante el suministro de un gas inerte que puede ser nitrógeno o dióxido de carbono. El segundo es añadir xileno entre 3 - 6% en peso de la carga total para retirar el agua de condensación por medio de una destilación azeotrópica. El tercero es mediante el uso de vacío, pero existe el riesgo de también perder glicol (Fink y Leoben, 2013, p. 9; Malik et al, 2000, p. 143; Cherian y Thachil, 2004, 831).

La presencia del oxígeno provoca la decoloración y para evitarla se utiliza un gas inerte como nitrógeno o dióxido de carbono. La adición de un inhibidor en las primeras etapas de la reacción preserva la claridad y el color de la resina. Los catalizadores empleados son: para-tolueno sulfónico, titanio de tetrabutilo y sales de estaño que proporcionan estabilidad en el almacenamiento de la resina (Ahamad, Lubi, Mohan, Safeer y Thachil, 2011, pp. 261-262).

La reacción es controlada mediante la medición del número ácido de pequeñas muestras de resina tomadas durante la reacción y son tituladas con una solución etanólica de hidróxido de potasio 0,1 N. El número ácido representa el número de miligramos de hidróxido de sodio equivalente a la acidez en un gramo de resina poliéster insaturada.

Normalmente se termina la reacción cuando se tiene un número ácido entre 50 - 25 (Brydson, 2000, p. 702).

Una vez alcanzado el número ácido deseado se añade inhibidores de polimerización como la hidroquinona. Para iniciar la mezcla con el monómero vinílico se debe tomar en cuenta dos consideraciones: si el poliéster está muy caliente se dará un curado prematuro conocido como gelación y si el poliéster está muy frío la viscosidad será muy alta y el proceso de mezcla se dificulta (Fink y Leoben, 2013, p. 9)

Por último un monómero vinílico es añadido, comúnmente se emplea estireno 35 % en peso a 70 - 80 °C (Abu et al, 2006, p. 23; Öztürk y Güçlü, 2007, p. 1542).

1.3.4 MECANISMOS DE CURADO DE RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS

La polimerización de una solución de poliéster en un monómero vinílico como el estireno es altamente exotérmica. Las moléculas de poliéster son los agentes de reticulación y el estireno sirve como un agente para unir las moléculas de poliéster. El proceso de curado vía radicales se puede dividir en cuatro etapas: inducción, formación de microgel, de transición, y macrogelación (Malik et al, 2000, p. 154):

- Período de inducción, muy poca polimerización tiene lugar. Se inicia con un entrecruzamiento intermolecular entre el poliéster y el monómero vinílico.
- Etapa migrogel, formación de estructuras esféricas (partículas de microgel) con una alta densidad de reticulación.
- Etapa de transición, los (C = C) enlaces dobles en el interior el microgel se someten a reticulación intramolecular, mientras que los de la superficie reaccionan con monómeros o microgeles lo cual ocasiona el crecimiento de microgel.
- Macrogelación que tiene lugar por microgeles intermoleculares y cúmulos de microgel que produce un fuerte aumento de la viscosidad.

En la Figura 1.17 se observa la reacción de reticulación del poliéster insaturado con el monómero de estireno.

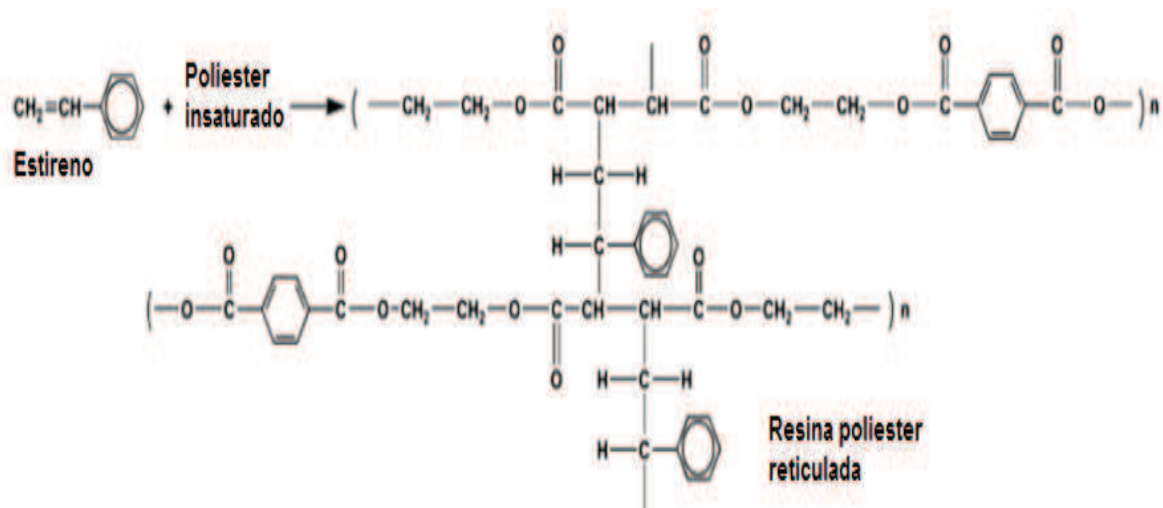


Figura 1.17. Reacción de reticulación del poliéster insaturado con el monómero de estireno
(Jeong et al, 2007, p.1078)

El curado en frío es el método convencional que emplea como iniciadores de la polimerización peróxidos a temperatura ambiente y aceleradores como las sales de cobalto. Las más comunes son el octoato de cobalto o naftenato de cobalto, se disuelven en monómeros de estireno e inician la descomposición del peróxido (Fink y Leoben, 2013, p. 25; Müller, 1996, pp. 90-91).

El peróxido de metil-etil cetona (MEKP) es el más usado para reticular los poliésteres insaturados a temperatura moderadas de 60 - 90 °C, también se emplean el peróxido de ciclohexanona y el hidroperóxido de cumeno para inician la reacción de entrecruzamiento entre el monómero no saturado y los dobles enlaces del poliéster. Primero se añade el acelerador y luego el peróxido. Los hidroperóxidos son usados para curar madera, muebles y recubrimientos en láminas. Para el curado en caliente se utiliza peróxido de di-t-butilo o perbenzoato de t-butilo entre 130 - 150 °C (Brydson, 2000, p. 703; Malik et al, 2000, p. 153).

En la Tabla 1.4 se presenta rango de temperatura óptima para iniciadores de curado de resinas de poliéster insaturadas.

Tabla 1.4. Rango de temperatura óptima para iniciadores de curado de resinas de poliéster insaturadas

Iniciadores	Aceleradores	Temperatura de procesamiento (°C)
Peróxido de benzoilo	Dimetilanilina	0-25
Peróxido de metil-etil cetona	Octoato de cobalto	20-25
Hidroperóxido de cumeno	Naftenato de manganeso	25-50
Peróxido de laurolio	Calor	50-80
Peroctoato de terbutilo	Calor	80-120
Peróxido de benzoilo	Calor	80-140
Perbenzoato de ter-butilo	Calor	105-150

(Nava, 2004, p. 53)

Las resinas que son sometidas a reacciones de reticulación experimentan algunos problemas durante el curado que pueden ser contracción, deformación y agrietamientos. Resinas formuladas con estireno tienen una contracción volumétrica del 17 %, lo cual provoca grietas y deformaciones en el producto final. Para reducir la contracción a un 12 % se realiza moldeados a altas temperaturas para evitar los vacíos, por lo general se emplea vinil-tolueno (Nava, 2004, p. 55).

La atmósfera de oxígeno inhibe la reacción de reticulación lo que conlleva a desarrollar superficies pegajosas en capas gruesas y superficies suaves en capas delgadas, debido a los radicales libres del proceso de polimerización que son sensibles al oxígeno. Para evitar este problema se añaden ceras de parafina (Müller, 1996, p.p. 84-85; Nava, 2004, p.56).

El curado de resinas por radiación describe un proceso de fotopolimerización que usa éteres de vinilo para copolimerizar con el poliéster insaturado en presencia de una cetona que actúa como foto-iniciador. Se emplea lámparas de alta presión de vapor de mercurio o lámparas de electrodos. Es un curado muy rápido. Éteres de alilo produce resinas de alta dureza y se reduce la inhibición por la presencia del oxígeno (Czub et al, 2005, pp. 66-67).

En el curado de la resina existen factores de importancia que deben ser tomados en cuenta para que el entrecruzamiento sea el esperado. Durante el proceso no se alcanza el 100 % del curado debido a que unos dobles enlaces permanecen en el producto final. Para conseguir una alta conversión es indispensable controlar la temperatura en la etapa inicial (50 - 80 °C) para favorecer a la reacción de copolimerización y evitar la gelación, en la etapa final la temperatura subirá por la naturaleza exotérmica de la reacción (Berzina, Kalnins, Rence y Viksne, 2002, p. 39).

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 DEPOLIMERIZACIÓN DE LAS BOTELLAS DE PET MEDIANTE UNA GLICÓLISIS ALCALINA

2.1.1 PREPARACIÓN DE LAS BOTELLAS PARA SU DEPOLIMERIZACIÓN

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó botellas de PET recicladas. En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo utilizado para la preparación de las botellas de PET que fueron depolimerizadas.

Se recolectaron botellas de PET de diferentes tamaños y colores, la selección de las botellas se realizó tomando en cuenta el color y marca; se decidió utilizar las botellas de agua de marca Dasani y Tesalia y se descartó las botellas de color verde, azul y amarillas para uniformizar la materia prima.

El lavado de las botellas seleccionadas se realizó con agua y detergente para eliminar las impurezas como polvo y residuos orgánicos. Se retiró las etiquetas y tapas manualmente para evitar la contaminación del PET con otro polímero en la molienda.

Se realizó dos etapas para reducir de tamaño; primero se cortaron manualmente las botellas en pedazos de aproximadamente 3x3 cm. Y posteriormente se realizó una molienda en un molino de cuchillas hasta obtener partículas entre 5 a 0,85 mm, el proceso se repitió hasta obtener 3 kg de PET molido.

Se almacenó el PET molido en recipientes cerrados para evitar que se contamine y adquiera humedad del ambiente.

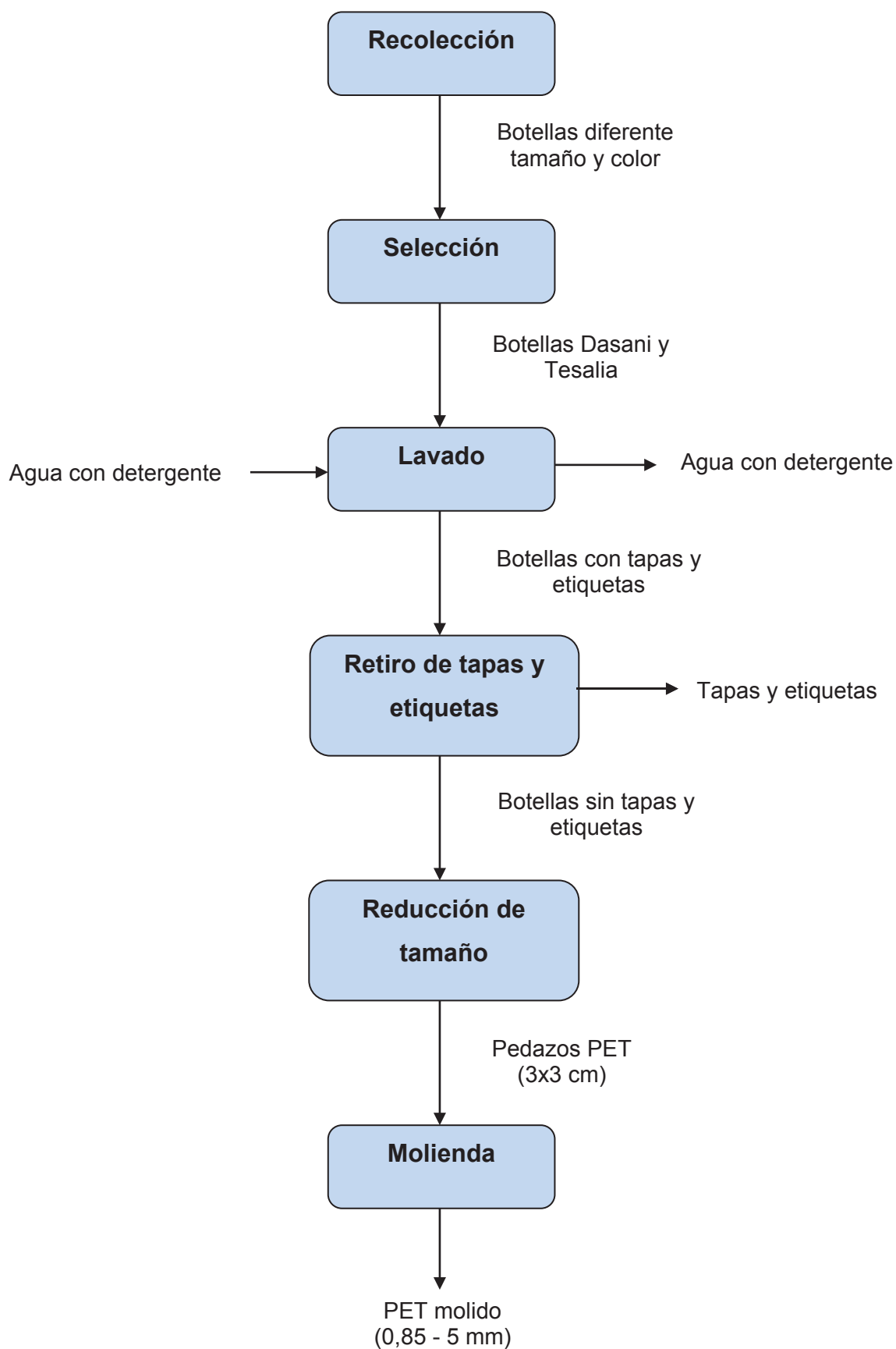


Figura 2.1. Diagrama de flujo para la preparación botellas de PET

2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Con el objetivo de obtener una muestra representativa de la cantidad de PET molido, se realizó un muestreo por cuarteo de cada marca de la siguiente manera:

Se colocaron las botellas molidas de marca Tesalia sobre una superficie plana y limpia para evitar contaminación del material, se acomodó el polímero en forma de pila cónica, posteriormente se presionó el vértice hasta obtener un espesor y un diámetro uniformes, se dividió la pila aplanada en cuatro partes iguales, se mezcló y homogenizó el material de cada división y se repitió el procedimiento hasta reducir la muestra al tamaño requerido para el posterior análisis; lo mismo se realizó con las botellas marca Dasani.

2.1.2.1 Análisis por espectroscopía de infrarrojo (FTIR)

Para caracterizar la materia prima, se realizó un análisis por espectroscopía infrarroja (FT-IR).

Con el fin de obtener una lámina delgada, se prensó alrededor de 0,5 g de material en medio de dos placas antiadherentes en una prensa Carver Modelo 2112-2. Las condiciones a las cuales se operó el equipo se indican en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Condiciones de operación de la prensa para la obtención de la lámina de PET

Temperatura (°C)	250
Presión (psi)	24 000
Tiempo (min)	0,5

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. Para conseguir buena resolución del espectro, se efectuó una normalización, suavizado de los picos y corrección de la línea base.

2.1.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Para la determinación de las propiedades térmicas de la materia prima se utilizó un calorímetro diferencial de barrido Netzsch, modelo DSC 204 F1 Phoenix, el cual dispone de un intracooler para el enfriamiento a velocidad constante.

Se pesó la muestra y se colocó en una celda de aluminio sellada. Los ensayos 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 280 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min
- b) **Paso isothermal:** se mantuvo la temperatura de 280 °C durante 10 minutos
- c) **Primer enfriamiento:** desde 280 °C hasta temperatura ambiente
- d) **Segundo calentamiento:** desde temperatura ambiente hasta 280 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min
- e) **Segundo enfriamiento:** desde 280 °C hasta 60 °C

La determinación de los valores de temperatura de fusión, transición vítrea y calor de fusión fue posible con ayuda del software que dispone el equipo en el que se realizó el ensayo.

2.1.3 PRUEBAS PRELIMINARES PARA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECICLAJE QUÍMICO

Se realizaron pruebas preliminares para seleccionar el proceso mediante el cual se realizó el reciclaje químico de las botellas de PET. Se escogió dos posibles métodos de reciclaje químico: hidrólisis ácida y glicólisis alcalina.

2.1.3.1 Reciclaje químico del PET mediante hidrólisis ácida

Se realizó una hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico a diferentes concentraciones que se indican en la Tabla 2.2.

En un reactor con agitación mecánica, sistema de calentamiento y un condensador se colocó el ácido y el PET molido en una relación de $\frac{0,1 \text{ g PET}}{1 \text{ ml solución}}$. La reacción se llevó a cabo a presión atmosférica y a 90 °C.

Tabla 2.2. Concentración de la solución de ácido sulfúrico

Prueba hidrólisis	Concentración solución de H_2SO_4 (M)
Prueba preliminar 1	15
Prueba preliminar 2	10
Prueba preliminar 3	7

2.1.3.2 Reciclaje químico del PET mediante glicólisis alcalina

Para la depolimerización del PET mediante una glicólisis alcalina se utilizó un glicol que en este caso fue el etilenglicol grado técnico y se empleó hidróxido de sodio como catalizador, en un reactor con agitación mecánica, sistema de calentamiento y un condensador.

La reacción se llevó a cabo condiciones de temperatura y presión determinadas en estudios realizados anteriormente por ser las mejores condiciones para la glicólisis alcalina.

El tamaño de partícula que se empleó es el resultado de la molienda explicada en la preparación de las botellas de PET, las condiciones de operación se indican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Condiciones de operación del reactor para la depolimerización

Temperatura (° C)	187
Presión (atm)	0,72
Tamaño partícula (mm)	0,85 - 5,00

Se realizaron pruebas preliminares para determinar la relación entre los gramos de PET y los mililitros de glicol $\frac{\text{gr PET}}{\text{ml Glicol}}$ en los cuales se logró depolimerizar la mayor cantidad de PET en un tiempo determinado.

En el reactor se colocó primero el etilenglicol y luego se añadió el hidróxido de sodio necesario de acuerdo a la estequiometría de la reacción representada en la ecuación 2.1, una vez disuelto el hidróxido se colocó 200 g de PET molido en un rango de 0,3 - 0,6 g PET/ml glicol.



Donde,

n : número de moles

Na_2TP : tereftalato de sodio

EG : etilenglicol

Para determinar el rendimiento de la reacción de depolimerización, se solubilizó la mezcla de reacción en agua destilada para poder filtrar el PET que no reaccionó, se lo colocó en la estufa durante 2 horas a 90 °C y se lo pesó.

2.1.4 GLICÓLISIS ALCALINA DE LAS BOTELLAS DE PET

En la Figura 2.2 se presenta el diagrama de bloques empleado en el proceso de depolimerización de las botellas de PET que se empleó posteriormente para la síntesis de la resina poliéster insaturada.

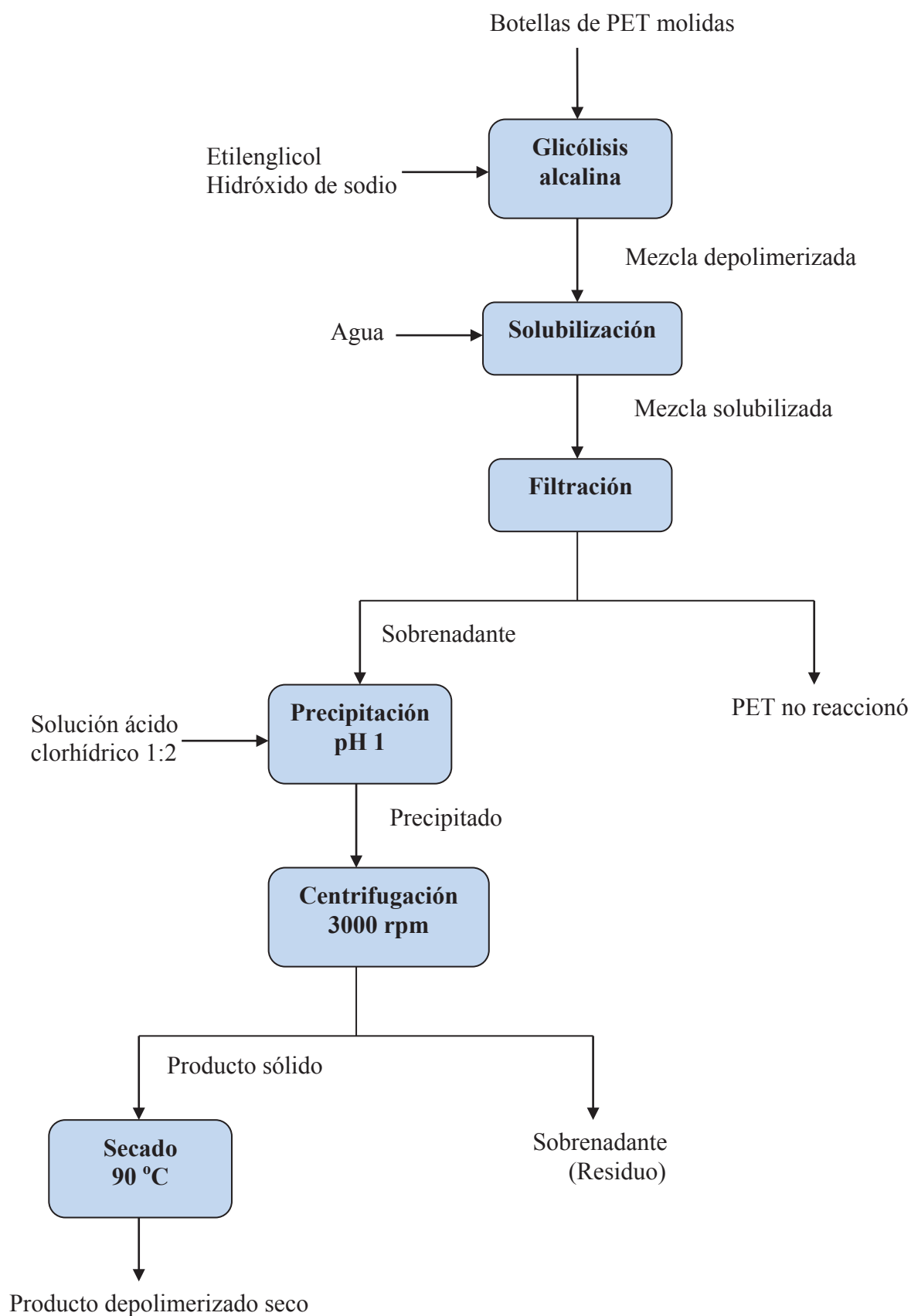


Figura 2.2. Diagrama de flujo de glicólisis alcalina de las botellas PET

Se realizaron 10 reacciones de depolimerización para obtener suficiente producto que fue empleado posteriormente en la síntesis de la resina. En cada prueba se depolimerizó 200 g de PET molido, se utilizó etilenglicol grado técnico y se empleó hidróxido de sodio como catalizador.

Las condiciones de operación fueron las mismas que se emplearon en las pruebas preliminares indicadas en la Tabla 2.3. La relación entre los gramos de PET por mililitros de glicol fue de 0,4 que se determinó de pruebas preliminares realizadas.

Al igual que en las pruebas preliminares para determinar el rendimiento de la reacción de depolimerización, se solubilizó la mezcla de reacción en agua destilada para poder filtrar el PET que no reaccionó, se lo secó y pesó.

2.1.4.1 Separación del producto obtenido en la glicólisis alcalina

Posteriormente de solubilizar la mezcla de la reacción y eliminar el PET que no reaccionó, se realizó una titulación potenciométrica con una solución 1:2 de ácido clorhídrico con el objetivo de precipitar el producto de la glicólisis.

Para separar el producto del exceso del etilenglicol, se colocó la mezcla precipitada en una centrífuga marca Thermo durante 5 min. El producto fue secado a 90 °C en una estufa durante 24 horas.

2.1.4.2 Caracterización del producto obtenido en la glicólisis alcalina del PET

Análisis por espectrofotometría infrarroja (FT-IR)

La espectrofotometría infrarroja se realizó para identificar el compuesto al que corresponde el producto obtenido de la glicólisis alcalina de las botellas del PET.

Se tomó una muestra de 50 ml de la mezcla solubilizada y se realizó una titulación potenciométrica con ácido clorhídrico hasta alcanzar el pH en el que se neutralizarán las sales de los ácidos carboxílicos. Los sólidos se separaron igualmente en la centrífuga y luego se secó el producto obtenido a 90 °C durante 24 h.

Los espectros se obtuvieron mediante la técnica de transmitancia, con una resolución de 4 cm⁻¹ y 9 barridos en un rango de 4 000 a 400 cm⁻¹. Se tomó una pisca de producto seco y se mezcló con bromuro de potasio previamente secado durante 3 horas a 100 °C. Con la ayuda de una prensa marca Carver se elaboró la pastilla de bromuro de potasio, las condiciones de operación de la prensa se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Condiciones de operación de la prensa para la obtención de la pastilla de bromuro de potasio

Presión (psi)	20 000
Tiempo (min)	0,5

Los espectros se obtuvieron con el espectrofotómetro infrarrojo Perkin Elmer modelo Spectrum One, equipo perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP).

Para conseguir buena resolución de los espectros, se efectuaron una normalización, suavizado de los picos y corrección de la línea base.

Análisis por resonancia magnética nuclear

Se realizó un análisis por resonancia magnética nuclear del producto de la depolimerización mediante glicólisis alcalina.

Se obtuvo el espectro de resonancia magnética nuclear y composición correspondiente al producto obtenido en la glicólisis alcalina del PET.

2.2 SÍNTESIS DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

2.2.1 OBTENCIÓN DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

La síntesis de la resina de poliéster insaturada se llevó a cabo mediante una reacción de policondensación entre el producto obtenido en la glicólisis alcalina del PET con un glicol y anhídrido maléico; para lo cual se empleó un reactor con agitación mecánica, sistema de calentamiento y un condensador.

Las condiciones de operación del reactor se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Condiciones de operación del reactor para la polimerización de la resina

Temperatura prepolimerización (° C)	120
Temperatura polimerización (° C)	190
Presión (atm)	0,72

El glicol usado en esta ocasión fue el propilenglicol por presentar mayor compatibilidad con el monómero que se empleó para el curado (Berzina, Kalnins, Rence y Viksne, 2002, p.37).

El agua que se formó durante la reacción de policondensación fue retirada con Nitrógeno, gas de arrastre que generó una atmósfera inerte. (Cano, Pérez y Espinel, 2002, p. 4; Müller, 1996, p. 89).

Se realizaron 9 pruebas de síntesis de resina de poliéster insaturada, teniendo en cuenta 3 alternativas:

1. El material reciclado
2. El material puro
3. Mezcla de materiales puro y reciclados.

Se decidió emplear las alternativas indicadas anteriormente con el objetivo de comparar resinas elaboradas a partir de material reciclado con resinas

sintetizadas a partir de material puro para estudiar la factibilidad de incorporar PET reciclado en la fabricación de resinas con material virgen. En la Tabla 2.6 se detallan la composición de cada resina que fue sintetizada.

Tabla 2.6. Composición de las resinas

Resina	Compuesto
Resina 1	Material reciclado
Resina 2	Material reciclado
Resina 3	Mezcla de material reciclado y puro
Resina 4	Material puro
Resina 5	Material puro
Resina 6	Material reciclado
Resina 7	Mezcla de material reciclado y puro
Resina 8	Material reciclado
Resina 9	Material reciclado

2.2.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÁCIDO

La monitorización de la reacción se la hizo mediante la cuantificación del número ácido de la resina (mg NaOH / g muestra). Se tituló 10 ml de resina disuelta en etanol con una solución etanólica de NaOH 0,1 M y fenoftaleína como indicador.

La síntesis se realizó hasta alcanzar un número ácido máximo de 30 mg NaOH / g muestra y la temperatura de reacción se incrementó hasta aproximadamente 180 °C (Elgegren y Nakamatsu, 2009, p. 7).

El número ácido se calculó aplicando la ecuación 2.2

$$\text{Índice de acidez} = \frac{5,61 \times V(\text{ml, NaOH } 0,1\text{N})}{\text{peso muestra(g)}} \quad [2.2]$$

2.2.3 CURADO DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

El curado de la resina se realizó vía radicales libres con un monómero vinílico que permitió un entrecruzamiento de las cadenas y además sirvió como solvente que hizo la resina menos viscosa, este monómero fue el estireno.

Una vez alcanzado el número ácido esperado, se añadió poco a poco el estireno para lo cual se enfrió la mezcla de reacción hasta aproximadamente 80 °C, se dejó reaccionar al poliéster y el estireno durante 30 minutos, sin calentamiento y con agitación mecánica.

La resina poliéster insaturada fue almacenada en frascos de vidrio herméticamente sellados para evitar la evaporación del solvente.

Para el curado de la resina se colocó 50 ml de resina en un recipiente, se añadió 3 gotas de octoato de cobalto que actuó como promotor de la reacción de reticulación y se mezcló durante 10 s, posteriormente se agregó 1 ml de MEKP peróxido que constituye el iniciador del proceso de curado y se mezcló durante 5 s. Finalmente se colocó en un molde previamente elaborado con papel aluminio (Elgegren y Nakamatsu, 2012, p. 9).

2.3 EVALUACIÓN DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

Se elaboró una resina poliéster insaturada con materiales puros: anhídrido maléico, anhídrido ftálico y propilenglicol para compararla con las resinas formuladas con material reciclado, adicionalmente se comparó con una resina comercial.

La evaluación del desempeño de la resina obtenida se lo hizo mediante el porcentaje de sólidos y dureza.

2.3.1 ANÁLISIS DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA POR ESPECTROFOTOMETRÍA INFRARROJA (FT-IR)

Para analizar las resinas poliéster insaturadas por FTIR se colocó 5 g del producto en papel aluminio y se secó durante 2 horas para eliminar el estireno y poder comparar las resinas elaboradas a partir de material reciclado con resinas sintetizadas a partir de material puro.

Los espectros se obtuvieron mediante la técnica de transmitancia, con una resolución de 4 cm^{-1} y 9 barridos en un rango de $4\ 000$ a 400 cm^{-1} . Se tomó una pisca de resina seca y se mezcló bien con bromuro de potasio previamente secado durante 3 horas a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con la ayuda de una prensa marca Carver se elaboró la pastilla de bromuro de potasio, las condiciones de operación de la prensa se detallan en la Tabla 2.5.

Para conseguir buena resolución de los espectros, se efectuaron una normalización, suavizado de los picos y corrección de la línea base.

2.3.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SÓLIDOS

El porcentaje de sólidos se determinó de acuerdo con la norma ASTM D2369-10, 2010. En papel de aluminio en forma rectangular, previamente pesado se colocó a aproximadamente 0,5 g de resina que se sintetizó y se llevó a la estufa donde permaneció una hora a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente se pesó la muestra y se calculó el porcentaje de sólidos.

2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA

La dureza se determinó mediante la norma ASTM D2240-05, 2010. La medición de la dureza de las resinas que se sintetizaron se realizó con un durómetro shore D, las resinas se colocaron en una superficie plana y se realizaron 10 mediciones

de cada una para sacar un valor promedio.

2.4 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR PARA LA DEPOLIMERIZACIÓN DE DESECHOS DE PET Y DEL REACTOR PARA LA POLIMERIZACIÓN DE RESINA DE POLIÉSTER INSATURADA

2.4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR PARA LA DEPOLIMERIZACIÓN DE DESECHOS DE PET

Se dimensionó el reactor para la depolimerización de 500 kg/día de desechos de PET. El reactor consta de tres partes: recipiente cilíndrico, fondo y tapa. También se incluyó el sistema de agitación y calentamiento.

2.4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR PARA LA POLIMERIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA

Se dimensionó el reactor para la polimerización de 500 kg/día de producto obtenido de la depolimerización del PET. El reactor consta de tres partes: recipiente cilíndrico, fondo y tapa. También se incluyó el sistema de agitación y calentamiento.

2.4.2.1 Criterios para el dimensionamiento de los reactores

Para el dimensionamiento de los reactores de depolimerización y polimerización se aplicó el código ASME sección VIII división 1, por ser la norma más conocida y de uso a nivel mundial.

Material de construcción

Para determinar el material de construcción de los reactores se tomó en cuenta: el máximo esfuerzo permisible del material en función de la presión que debe soportar; condiciones a las que se encuentran los reactores como temperatura de depolimerización del PET y polimerización de la resina y los medios en que se dan las reacciones que pueden ser corrosivos.

Dimensionamiento reactor

Se dimensionó cada una de las secciones del reactor: recipiente cilíndrico, fondo y tapa, se calcularon los espesores de cada sección para lo cual se consideró las presiones internas y externas en cada caso y se determinó la altura del fondo y de la tapa de cada reactor. Se seleccionó la forma de la cabeza y fondo del reactor en función del costo y las más utilizada a nivel industrial.

Sistema de agitación

Para el dimensionamiento de los agitadores se tomó en cuenta el volumen y la viscosidad del fluido, se determinaron las dimensiones de acuerdo con proporciones geométricas estándares, encontradas en bibliografía que se indica en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Proporciones típicas para el diseño de un agitador tipo turbina

$\frac{D_a}{D} = \frac{1}{3}$	$\frac{w}{D_a} = \frac{1}{5}$
$\frac{E}{D_a} = 1$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$
$\frac{H}{D_t} = 1$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$

(Harriott, McCabe y Smith, 1998, p. 251)

Sistema de calentamiento

Se seleccionó el fluido para el sistema de calentamiento con el cual se determinó el coeficiente global y el área de transferencia de calor.

2.4.3 DISEÑO DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA MEDIANTE EL RECICLAJE QUÍMICO DE DESECHOS DE POLIETILENTEREFTALATO

2.4.3.1 Diseño conceptual

Capacidad

La capacidad de producción de la planta se determinó tomando en cuenta las importaciones de PET en el año 2011 como se indica en la Tabla 2.8, que según los datos oficiales del Banco Central del Ecuador (número de partida 3907609000) fueron aproximadamente 47 000 Toneladas. El 20 % del material será reutilizado.

Una planta industrial procesaría el 20 % del material post-consumo. Para el diseño del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de PET, se consideró una producción del 10 % del material disponible reciclado.

Tabla 2.8. Importaciones de PET en los últimos 3 años

Año	Peso (TM)	FOB-Dólar	CIF-Dólar
2009	44 530,38	49 523,12	51 979,73
2010	46 897,88	61 831,34	66 444,71
2011	47 069,18	84 025,60	87 203,44

(Banco Central del Ecuador, 2012)

Localización

La localización se fundamentó en un análisis ponderativo, basado en la posibilidad de situar la planta en tres diferentes lugares. Se tomó en cuenta la disponibilidad de materia prima, facilidad de transporte, fuerza laboral, mercado, disponibilidad de energía eléctrica, suministro de agua, comunidad, características del sitio, clima, protección contra el fuego e inundaciones y eliminación de desechos.

2.4.3.2 Diseño básico

Alcance del proyecto

Se desarrolló el proceso tecnológico para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET), se detalló los procesos mediante una secuencia de operaciones, balance de masa, selección de los principales equipos, diagramas de flujo, distribución en planta y hojas de especificación de los equipos.

Además realizó un análisis económico preliminar para la obtención de resina poliéster insaturada a partir de desechos de PET.

Criterios para la selección y dimensionamiento de equipos

La selección de equipos se realizó en función de las operaciones presentes en el proceso de obtención de la resina poliéster insaturada y del balance de masa, de la capacidad requerida para cada operación, del material almacenado, además se tomó en cuenta un 20 % de sobredimensionamiento.

2.5 ANÁLISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN DE RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS

Se realizó un análisis de costos preliminar para la producción de resinas poliéster insaturadas a partir de botellas de PET. Los costos se estimaron con base en los balances de masa y energía.

Se determinó la inversión fija de equipos y terrenos; y el costo de producción de 1 kilogramo de resina poliéster insaturada para lo cual se consideró:

- costos de materia prima
- Salario mínimo con beneficios de ley
- Costo de m³ agua
- Alcantarillado
- Comercialización agua
- Costo kWh
- Recargo industrial
- Alumbrado público
- Comercialización energía
- Recolección basura
- Cuerpo de bomberos

Finalmente se calculó el costo de producción por kilogramo de resina poliéster insaturada con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo}_{\text{materia prima}} + \text{Costo}_{\text{mano obra}} + \text{Costo}_{\text{agua}} + \text{Costo}_{\text{energía}} = \text{Costo}_{\text{producción}} \quad [2.3]$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DEPOLIMERIZACIÓN DE LAS BOTELLAS DE PET MEDIANTE UNA GLICÓLISIS ALCALINA

3.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

3.1.1.1 Análisis por espectroscopía de infrarrojo (FTIR)

Las botellas de PET se analizaron mediante la técnica FTIR por transmitancia, a continuación se muestran los espectros infrarrojos obtenidos con una resolución de 4 cm^{-1} y 9 barridos en un rango de 4000 a 450 cm^{-1} .

En la Figura 3.1 se muestra el espectro IR de la botella marca Tesalia superpuesto con el estándar del PET disponible en el espectrofotómetro en donde se realizaron las pruebas.

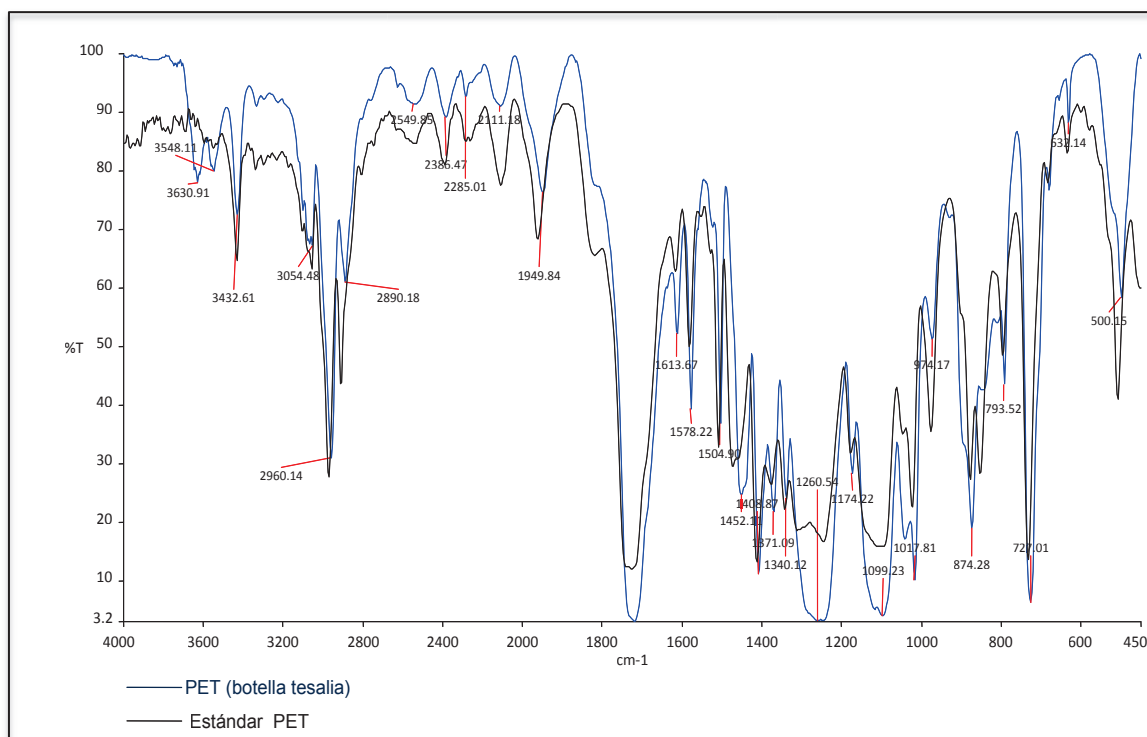


Figura 3.1. Espectro infrarrojo de una botella marca Tesalia superpuesto con el estándar de PET

Al analizar el espectro se determinó que la muestra se trataba de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y éster de ácido carboxílico tipo isoftalato. En el análisis de los grupos funcionales presentes se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.1.

En la Figura 3.2 se muestra el espectro IR de la botella marca Dasani superpuesto con el estándar del PET disponible en el espectrofotómetro en donde se realizaron las pruebas.

Al analizar el espectro se determinó que la muestra se trataba de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y éster de ácido carboxílico tipo isoftalato. En el análisis de los grupos funcionales presentes se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.1.

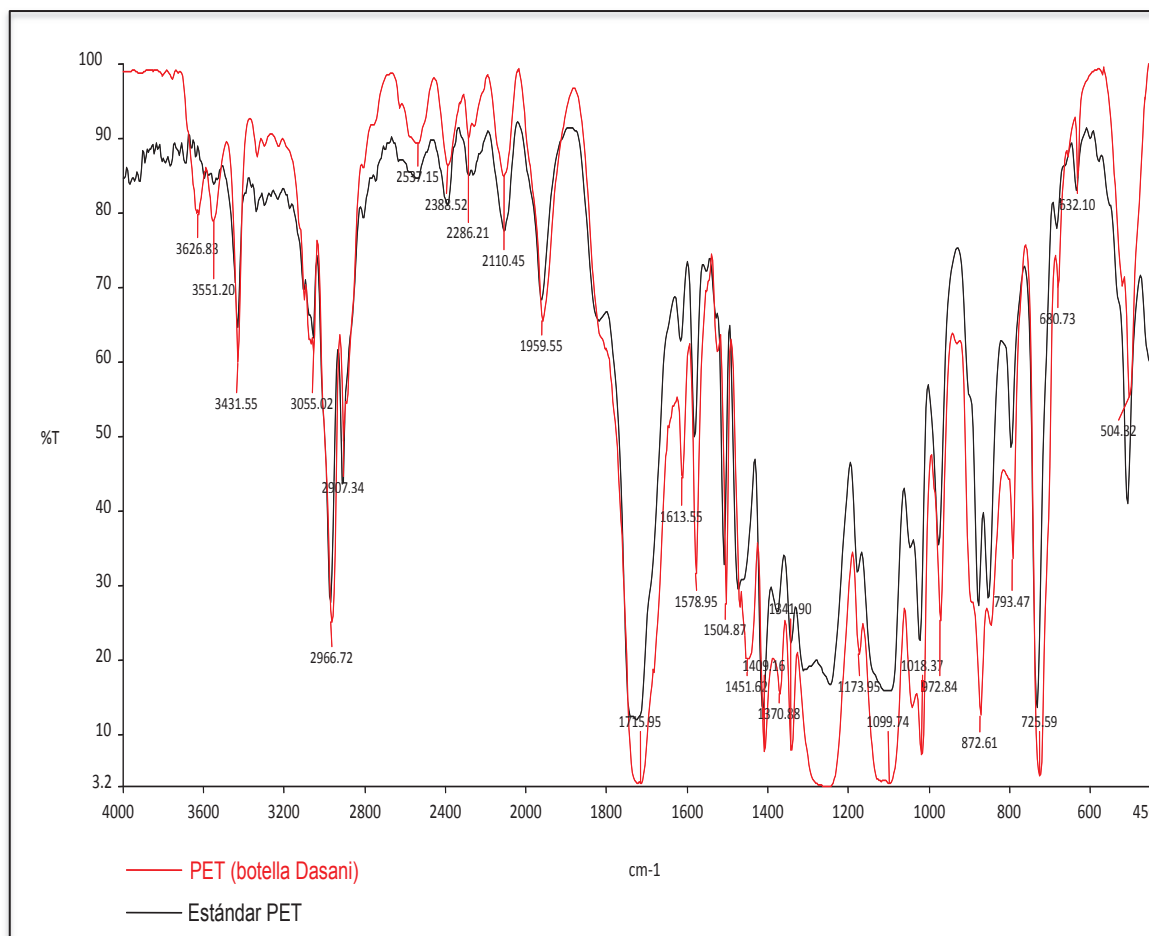


Figura 3.2. Espectro infrarrojo de una botella marca Dasani superpuesto con el estándar de PET

Los espectros concuerdan en la ubicación de las bandas pero no estuvieron superpuestos con el estándar debido a una diferencia en la intensidad de las bandas, como consecuencia del espesor de la lámina utilizada para la obtención del espectro de la muestra. La ley de Lambert y Beer demuestra que a mayor concentración de la muestra, mayor será la intensidad de las bandas (Smith, 2011,p. 149).

Se observó que los espectros PET botella y PET estándar coincidieron en las bandas, lo que demostró que las botellas están elaboradas del mismo material.

Tabla 3.1. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la botella de PET

Grupo funcional	Número de onda cm⁻¹
Alifático	2 990 - 2 855 1 485 - 1 415
Aromático	3 100 - 3 000 2 980 - 2 835 1 625 - 1 575 1 530 - 1 485 1 475 - 1 435 825 - 660
Éster de ácido carboxílico tipo tereftálico	1 735 - 1 710 1 525 - 1 500 1 420 - 1 395 1 280 - 1 250 1 115 - 1 005 1 030 - 1 005 885 - 860 735 - 720
Éster de ácido carboxílico tipo isoftálico	1 740 - 1 720 1 615 - 1 595 1 310 - 1 280 1 250 - 1 225 1 150 - 1 120 1 100 - 1 070 740 - 720

3.1.1.2 Caracterización por calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En la Figura 3.3 se muestra el termograma obtenido del ensayo correspondiente a la botella de PET marca tesalia para la determinación de la de temperatura fusión y transición vítrea.

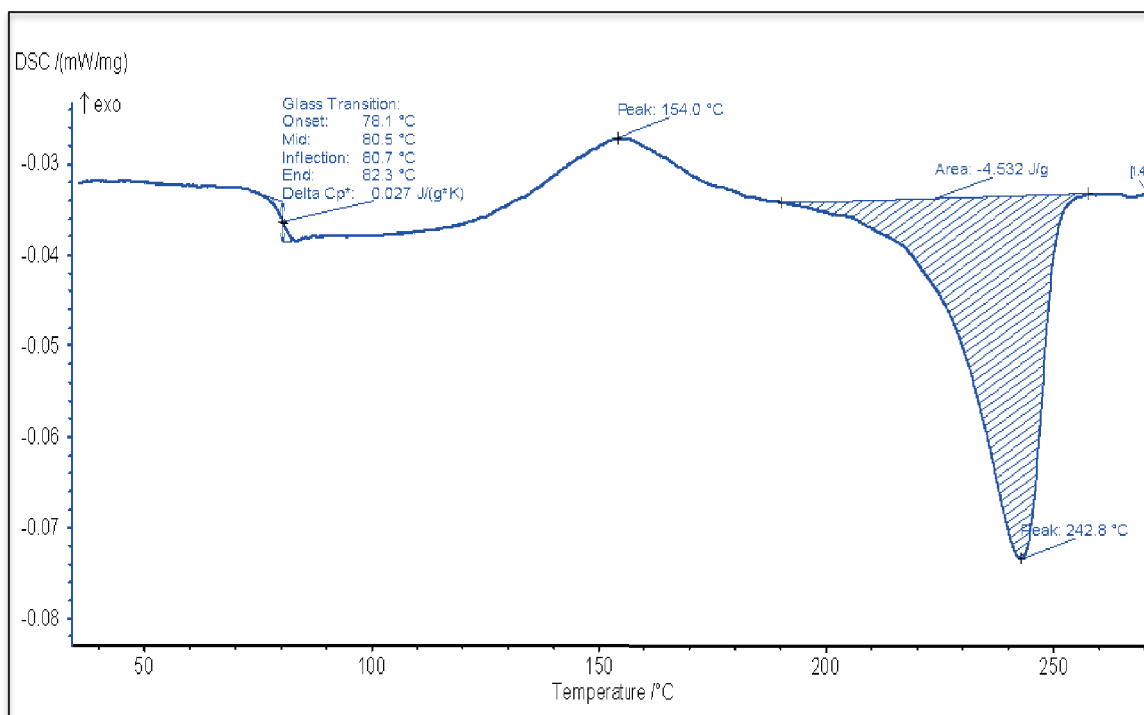


Figura 3.3. Termograma obtenido para la determinación de la temperatura de fusión y transición vítrea de la botella marca Tesalia

La botella marca Tesalia presenta una temperatura de fusión de 242,8 °C menor a la del PET que se encuentra en un rango de 250 a 260 °C y una temperatura de transición vítrea de 80,5 °C ligeramente mayor en comparación con la Tg del PET que está dentro de un rango de 70 a 80 °C.

Este comportamiento se asocia a la composición química de la botella ya que mediante un análisis FTIR se determinó que se trataba de una mezcla de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y tipo isoftalato. Además, el termograma corresponde al primer barrido que nos indica el historial térmico del material por lo que se observa un pico de cristalización en frío lo cual indica que el polímero sufrió un proceso de enfriamiento rápido por tanto es amorfo.

En la Figura 3.4 se muestra el termograma obtenido del ensayo correspondiente a la botella de PET marca Dasani para la determinación de la de temperatura fusión y transición vítrea.

La botella marca Dasani presenta una temperatura de fusión de 245,5 °C menor a la del PET que se encuentra en un rango de 250 a 260 °C y una temperatura de transición vítrea de 81,4 °C mayor en comparación con la Tg del PET que está dentro de un rango de 70 a 80 °C, este comportamiento como se indicó anteriormente se asocia a la composición química de la botella.

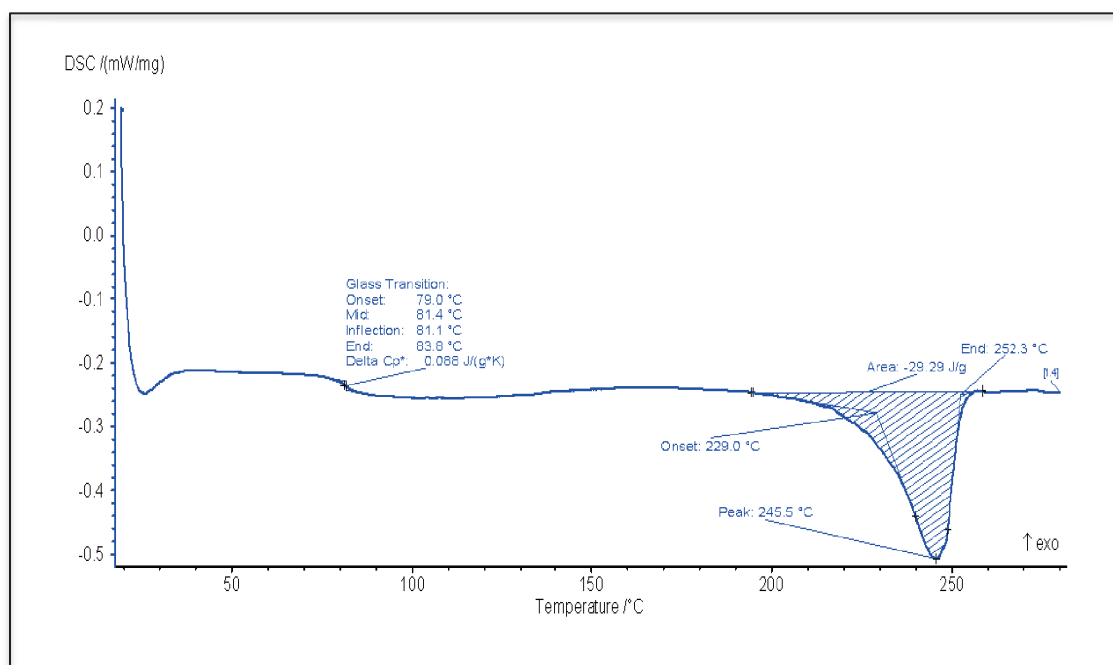


Figura 3.4. Termograma obtenido para la determinación de la temperatura de fusión y transición vítrea de la botella marca Dasani

3.1.2 PRUEBAS PRELIMINARES PARA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECICLAJE QUÍMICO

3.1.2.1 Reciclaje químico del PET mediante hidrólisis ácida

Los resultados de las pruebas preliminares de la depolimerización del PET mediante hidrólisis ácida no fueron satisfactorios.

La reacción se realizó durante 4 horas y se decidió utilizar ácidos de alta concentración para evitar las altas presiones y temperaturas como se indica en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultado de la hidrólisis del PET

Prueba hidrólisis	Concentración Solución de H₂SO₄ (M)	Resultado
Prueba preliminar 1	15	Mezcla quemada
Prueba preliminar 2	10	Mezcla quemada
Prueba preliminar 3	7	Mezcla quemada

La mezcla de reacción se quemó como se puede observar en la Figura 3.5, incluso al disminuir la concentración del ácido.



Figura 3.5. Resultado no satisfactorio de la hidrólisis ácida del PET

Factores como la presión y temperatura impidieron que la reacción se lleve a cabo con éxito ya que para obtener PET depolimerizado se requiere de presiones mayores a 1 atm, lo cual fue imposible conseguir en un reactor de vidrio.

3.1.2.2 Reciclaje químico del PET mediante glicólisis alcalina

Las pruebas preliminares de la glicólisis alcalina del PET se realizaron con diferentes relaciones g PET/ml EG.

El rendimiento de cada reacción se muestra en la Tabla Tabla 3.3, lo cual indica que el PET fue depolimerizado casi completamente con las diferentes relaciones empleadas.

Los rendimientos de los diferentes ensayos realizados fueron mayores al 99 %, para lo cual fue necesario un tiempo de reacción de 4 horas, por tanto, la glicólisis alcalina es un método eficaz para el propósito requerido que es el reciclaje químico de las botellas PET.

Tabla 3.3. Rendimiento de la glicólisis alcalina a diferentes relaciones g PET/ml EG

$\frac{\text{g PET}}{\text{ml EG}}$	Rendimiento (%)
0,3	99,84
0,4	99,57
0,5	99,52
0,6	99,56

Los cálculos realizados para determinar el rendimiento de la glicólisis alcalina se presentan en el ANEXO I.

3.1.3 GLICÓLISIS ALCALINA

La depolimerización de las botellas de PET para la síntesis de la resina poliéster insaturada se realizó mediante glicólisis alcalina debido al buen rendimiento de la reacción se obtuvo en las pruebas preliminares y además con la hidrólisis ácida no se obtuvo resultados satisfactorios; los parámetros que se emplearon para la glicólisis alcalina del PET se detallan en la Tabla 3.4.

El tiempo de reacción y la relación g PET/ ml EG se determinó en las pruebas preliminares de depolimerización del PET mediante glicólisis alcalina. Se seleccionó una relación de 0,4 g PET/ml EG por ser un valor intermedio y porque al depolimerizar 200 g del polímero, la proporción de PET y etilenglicol permite tener una buena agitación de la mezcla lo que favorece a la reacción.

Tabla 3.4. Parámetros para la glicólisis alcalina del PET

Temperatura (° C)	187
Presión (atm)	0,72
Tamaño partícula (mm)	0,85 - 5,00
$\frac{\text{g PET}}{\text{ml EG}}$	0,4
Tiempo (h)	4

En la Tabla 3.5 se presentan los rendimientos de las diferentes pruebas de glicólisis alcalina. Los rendimientos obtenidos son mayores al 99 %, por tanto se logró reciclar en su mayoría el PET y obtener la cantidad suficiente de producto depolimerizado para su posterior uso en la reacción de síntesis de la resina poliéster insaturada.

Tabla 3.5. Rendimiento de la glicólisis alcalina del PET con una relación g PET/ml EG=0,4

Prueba	Rendimiento (%)
Prueba 1	99,70
Prueba 2	99,51
Prueba 3	99,83
Prueba 4	99,34
Prueba 5	99,64
Prueba 6	99,87
Prueba 7	99,46
Prueba 8	99,75
Prueba 9	99,88
Prueba 10	99,62
Promedio	99,66

Los datos y cálculos realizados para determinar el rendimiento de la glicólisis alcalina se presentan en el ANEXO II.

3.1.4 CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO EN LA GLICÓLISIS ALCALINA DEL PET

3.1.4.1 Análisis por espectrofotometría infrarroja (FT-IR)

El producto obtenido de la glicólisis alcalina del PET se analizó mediante la técnica FTIR por transmitancia. En la Figura 3.6 se muestra el espectro infrarrojo con una resolución de 4 cm^{-1} y 9 barridos en un rango de 4000 a 400 cm^{-1} .

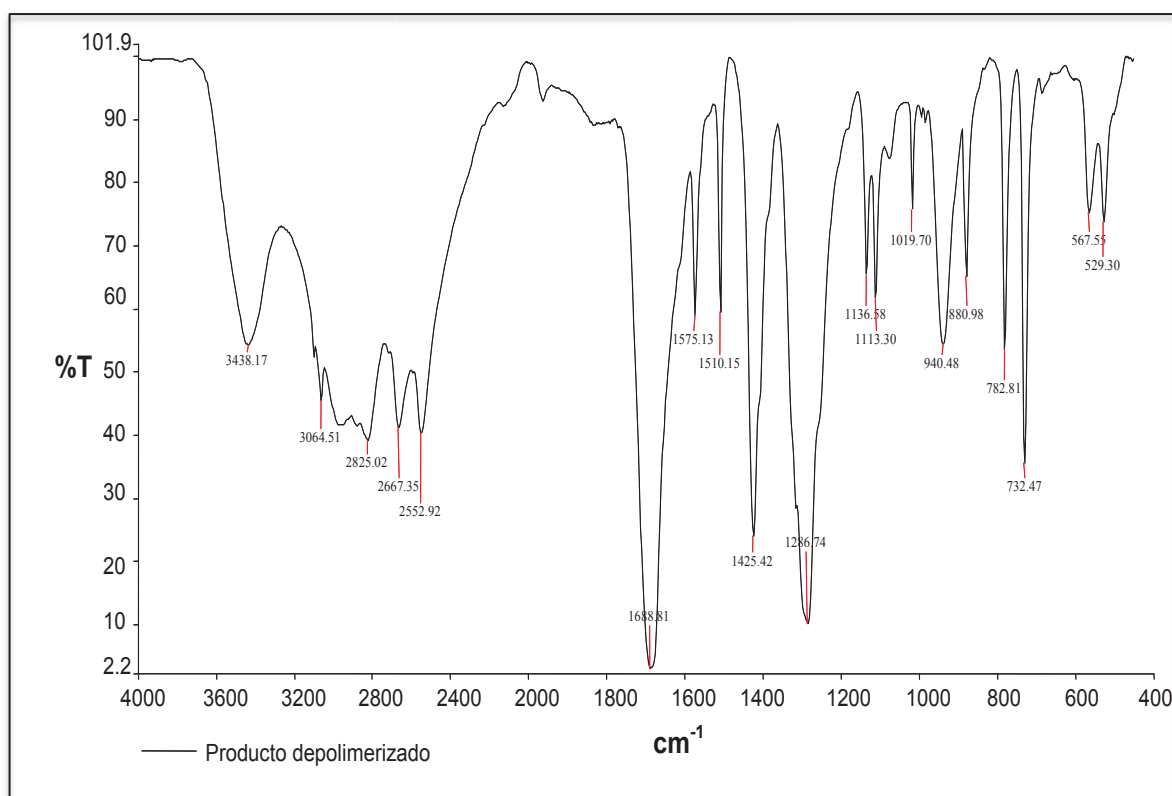


Figura 3.6. Espectro infrarrojo del producto de la glicólisis

En la Figura 3.7 se muestran los espectros IR del producto de la glicólisis alcalina de las botellas de PET superpuesto con el estándar del ácido tereftálico disponible en el espectrofotómetro en donde se realizaron las pruebas.

Se determinó que la muestra se trataba de un ácido carboxílico aromático ya que se encontraron las bandas características en 1 678, 1 509, 1 424, 1 281. La sustitución 1,4 aromático presente en las bandas 1509, 850 corresponde al ácido tereftálico.

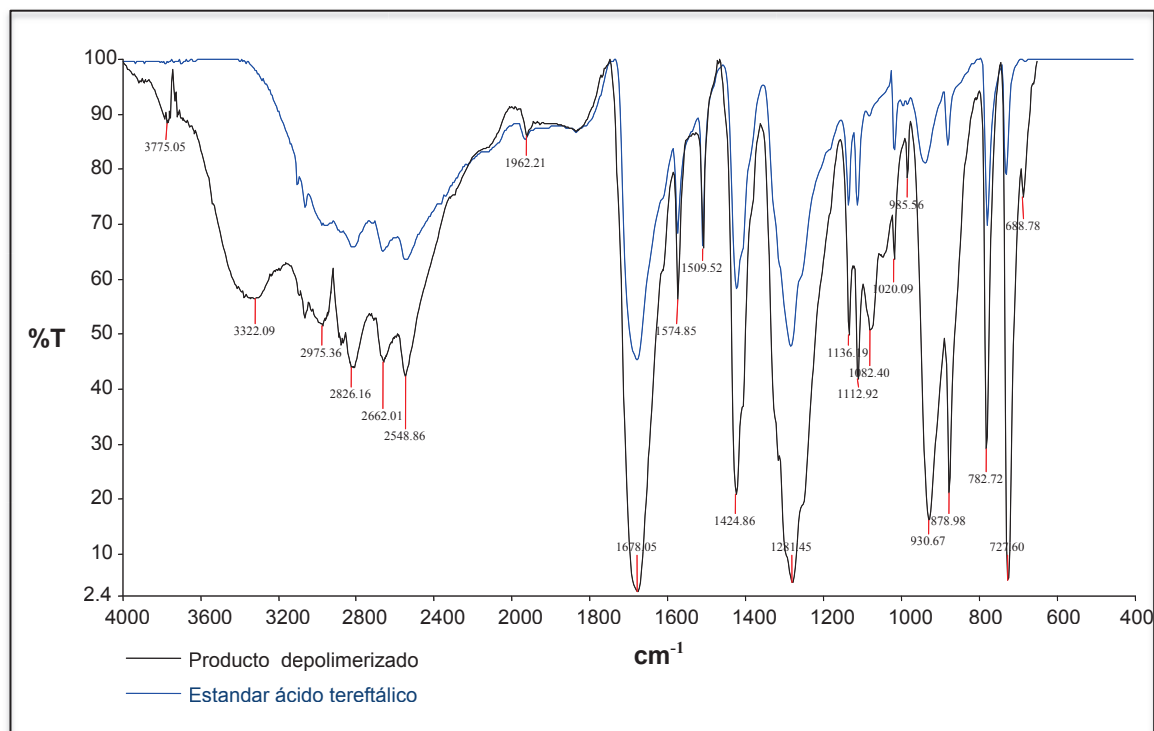


Figura 3.7. Espectros infrarrojos del producto de la glicólisis superpuestos con estándar del ácido tereftálico

En la Figura 3.8 se muestran los espectros IR del producto de la glicólisis alcalina de las botellas de PET superpuesto con el estándar del ácido tereftálico disponible en el espectrofotómetro en donde se realizaron las pruebas.

Se determinó que la muestra se trataba de un ácido carboxílico aromático ya que se encontraron las bandas características en 2 548, 1 424, 1 281. La sustitución 1,3 aromático presente en las bandas 1 595, 930, 727 corresponde al ácido isoftálico.

Se observa tanto en la Figura 3.7 como en la Figura 3.8 que los espectros concuerdan en la ubicación de las bandas pero no estuvieron superpuestos con los estándares debido a una diferencia en la intensidad de las bandas, lo cual fue

consecuencia de la concentración de producto en la pastilla de bromuro utilizada para la obtención del espectro de la muestra.

En el análisis de los grupos funcionales presentes se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro del producto de la glicólisis del PET

Grupo funcional	Número de onda cm ⁻¹
Alifático	2 990 – 2 855 1 485 - 1 415
Alquilo	2 990 – 2 855 1 485 – 1 415
Aromático	3 100 – 3 000 2 980 – 2 835 1 625 – 1 575 1 530 – 1 485 1 475 – 1 435 825 - 660
Ácido carboxílico aromático	2 710 – 2 630 2 600 – 2 500 1 690 – 1 665 1 615 – 1 495 1 435 – 1 400 1 325 – 1 280
Aromático, sustitución 1,3	1 625 – 1 595 1 495 – 1 475 920 – 825 820 - 765 730 - 660
Aromático, sustitución 1,4	1 525 – 1 485 850 - 790

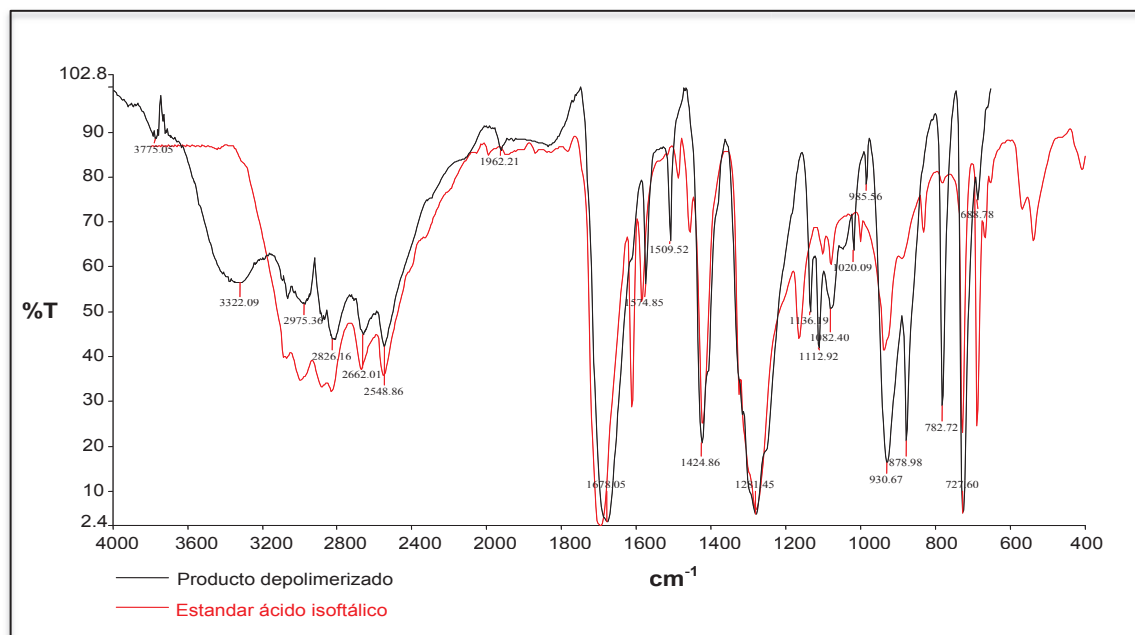


Figura 3.8. Espectros infrarrojos del producto de la glicólisis superpuestos con estándar del ácido isoftálico

3.1.4.2 Análisis por resonancia magnética nuclear

En la Figura 3.9 y 3.10 se observan los espectros de resonancia magnética nuclear correspondientes al producto obtenido en la glicólisis alcalina del PET.

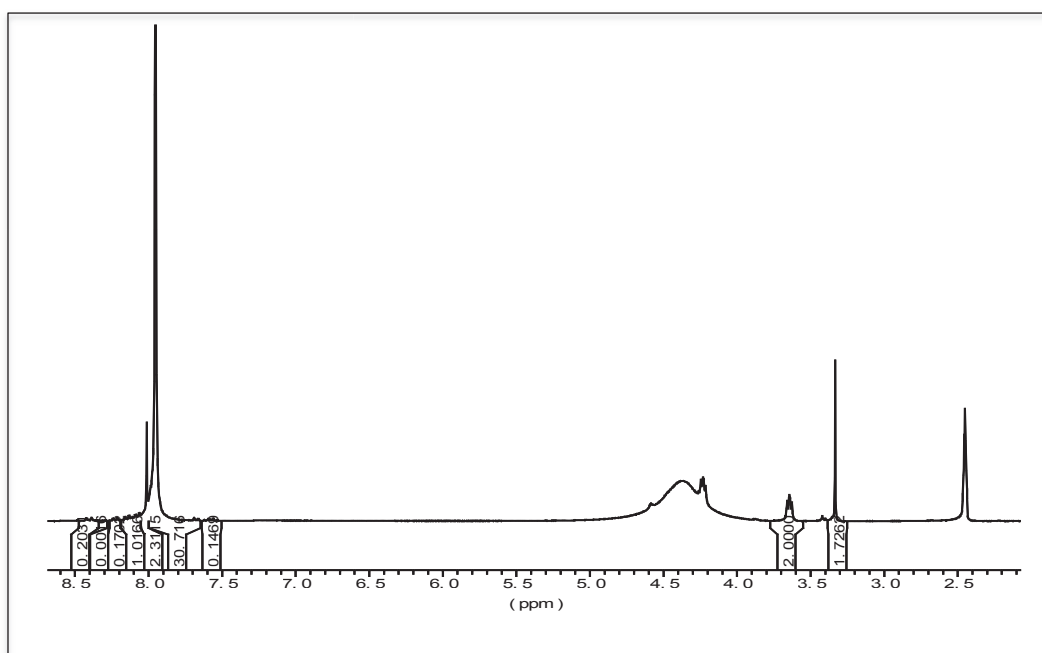


Figura 3.9. Espectro 1 RMN del producto de la glicólisis alcalina

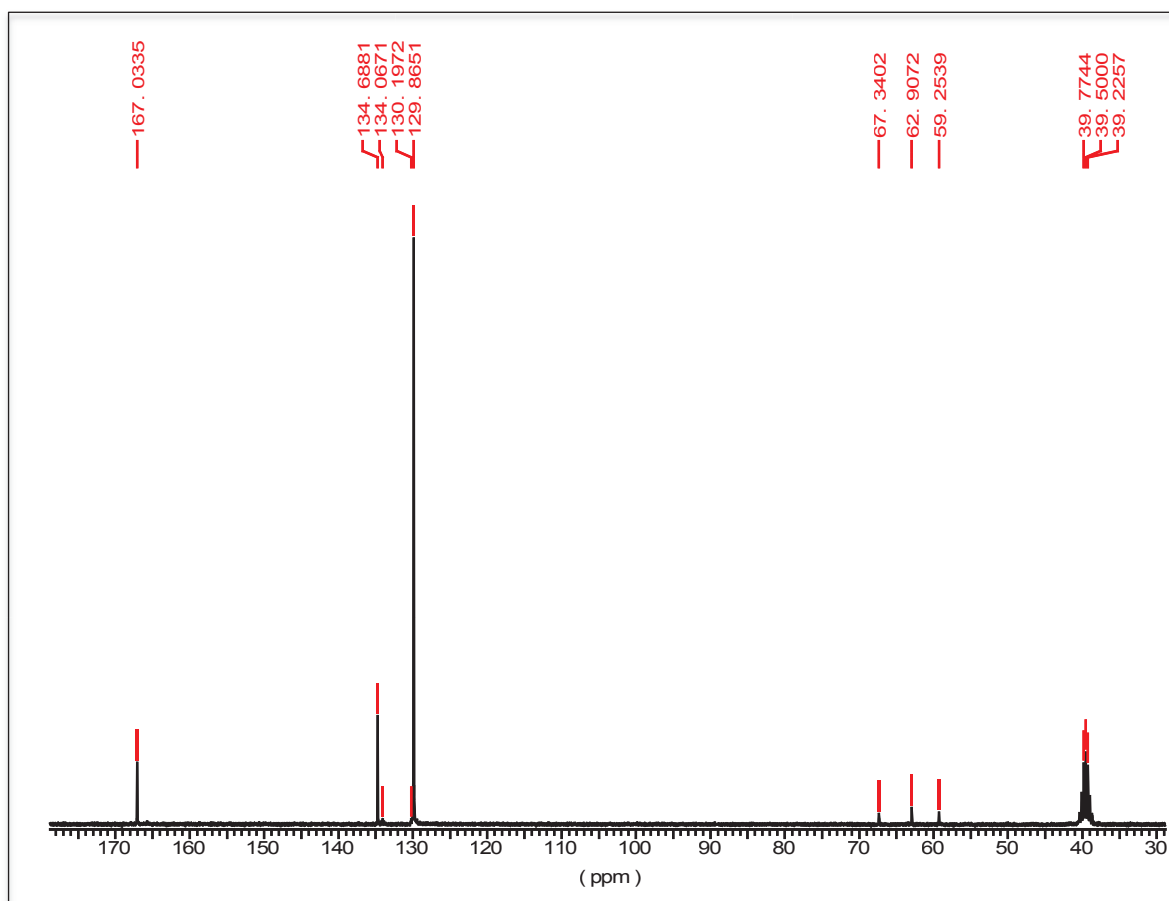


Figura 3.10. Espectro 2 RMN del producto de la glicólisis alcalina

En la Tabla 3.7 se indica el resultado del análisis por resonancia magnética nuclear de la muestra del producto de la glicólisis alcalina de las botellas de PET.

Tabla 3.7. Composición del producto de la glicólisis alcalina del PET determinada mediante análisis RMN

Compuesto	Porcentaje (%)
Ácido tereftálico	87,7
Ácido isoftálico	1,7
Bis (hidroxi etilen tereftalato)	5,7
Etilenglicol	4,9

La presencia de etilenglicol se asocia con un ineficiente proceso de secado fue realizado en una estufa a 100 °C y debido a que el EG tiene un punto de ebullición muy elevado de 187 °C no fue posible eliminarlo totalmente.

3.2 SÍNTESIS DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

La síntesis de las diferentes resina poliéster insaturada elaboradas a partir de material reciclado y material puro fue satisfactoria. En Tabla 3.8 la se indica las condiciones determinadas durante la síntesis de las resinas.

Tabla 3.8. Condiciones de operación durante la síntesis de la resina poliéster insaturada

Temperatura prepolimerización (°C)	120
Temperatura polimerización (°C)	190
Presión (atm)	0,72
pH	4

La temperatura durante la reacción se determinó con una la ayuda de una termocupla, durante la fase inicial de prepolimerización se mantuvo aproximadamente a 120 °C en esta fase dio la solubilización y mezcla de los reactivos. En la segunda etapa de polimerización se registró una temperatura aproximadamente de 190 °C en la cual se observó el aumento de la viscosidad y un cambio de color de la mezcla reaccionante, además se produjo la eliminación del agua que fue producto de la policondensación. La reacción se llevó a cabo en medio ácido pH=4 el cual se determinó durante la fase inicial de la reacción con un pH metro.

Las resinas elaboradas a partir de material reciclado fueron de diferente color en comparación a las resinas elaboradas a partir de material puro, ésta última de apariencia transparente y color ligeramente ámbar es más parecida a la resina comercial. La diferente tonalidad de las resinas con material reciclado fue originada por la presencia de ácido que no reaccionó completamente y a la posible formación de productos secundarios como éteres que afectaron al color final de la resina.

Además por motivo económicos durante la primera fase de prepolimerización no se suministró nitrógeno por lo que se asocia la ausencia de nitrógeno con posible

proceso oxidativo causado por el oxígeno del aire, esto dio como resultado que las resinas sean más oscuras y opacas en comparación con la resina comercial.

En la Figura 3.11 se observa la resina poliéster insaturada 1, elaborada con el producto de la depolimerización del PET.



Figura 3.11. Resina 1: Material Reciclado

En la Figura 3.12 se observa la resina poliéster insaturada 3, elaborada con el producto de la depolimerización del PET y material puro.



Figura 3.12. Resina 3: Material Reciclado Y Puro

En la Figura 3.13 se observa la resina poliéster insaturada 4, elaborada con material puro (anhídrido ftálico).



Figura 3.13. Resina 4: Material Puro

En la Figura 3.14 se observa la resina poliéster insaturada 5, elaborada con material puro (anhídrido ftálico).



Figura 3.14. Resina 5: Material Puro

En la Figura 3.15 se observa la resina poliéster insaturada 6, elaborada con el producto de la depolimerización del PET.



Figura 3.15. Resina 6: Material Reciclado

En la Figura 3.16 se observa la resina poliéster insaturada 7, elaborada con el producto de la depolimerización del PET y material puro.



Figura 3.16. Resina 7: Material Reciclado Y Puro

En la Figura 3.17 se observa la resina poliéster insaturada 9, elaborada con el producto de la depolimerización del PET.



Figura 3.17. Resina 9: Material Reciclado

En el ANEXO III se presenta la composición de cada resina.

3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

Las resinas sintetizadas se analizaron mediante la técnica de espectrofotometría de infrarrojo por transmitancia. En la Figura 3.18 se muestra el espectro IR de la resina 1 (material reciclado) con una resolución de 4 cm^{-1} y 9 barridos en un rango de $4\,000$ a 400 cm^{-1} .

En el análisis de los grupos funcionales presentes se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.9.

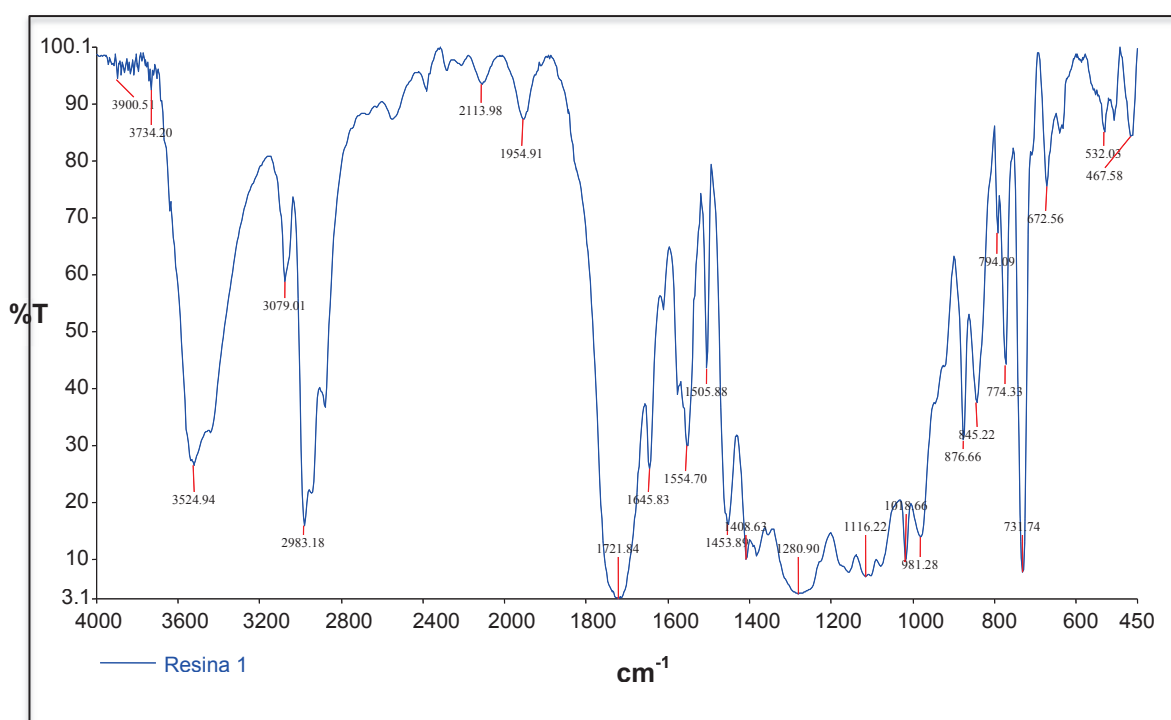


Figura 3.18. Espectro infrarrojo de la resina 1

La resina 1 presenta bandas características de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y sustitución aromática 1,4; ya que fue elaborada con el producto de la depolimerización el cual se indicó anteriormente que se trataba ácido tereftálico.

La presencia de grupos hidroxilo se asocia con el propilenglicol empleado en la síntesis de la resina debido a que este compuesto fue añadido en exceso para evitar la polimerización prematura (gelación) de la resina.

Tabla 3.9. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la resina 1

Grupo funcional	Número de onda cm ⁻¹
Alquilo	2 990 - 2 855 1 485 - 1 415
Alquilo sustitución metilo	2 980 - 2 950 2 885 - 2 865 1 465 - 1 445 1 380 - 1 365
Aromático sustitución 1,4	1 525 - 1 485 850 - 790
Hidroxilo	3 540 - 3 200 1 205 - 885
Éster de ácido carboxílico tipo tereftalato	1 735 - 1 710 1 525 - 1 500 1 420 - 1 395 1 280 - 1 250 1 115 - 1 005 1 030 - 1 005 885 - 860 735 - 720

En la Figura 3.19 se muestra el espectro IR de la resina 3 (elaborada con material reciclado y puro) con una resolución de 4 cm⁻¹ y 9 barridos en un rango de 4 000 a 400 cm⁻¹.

La resina 3 presenta bandas características de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y tipo ftalato, debido a que fue elaborada con una mezcla de material reciclado (producto de la depolimerización) y material puro (anhídrido ftálico).

La presencia de grupos hidroxilo se asocia con el propilenglicol empleado en la síntesis de la resina debido a que este compuesto fue añadido en exceso para evitar la polimerización prematura (gelación) de la resina.

En el análisis de los grupos funcionales presentes se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.10.

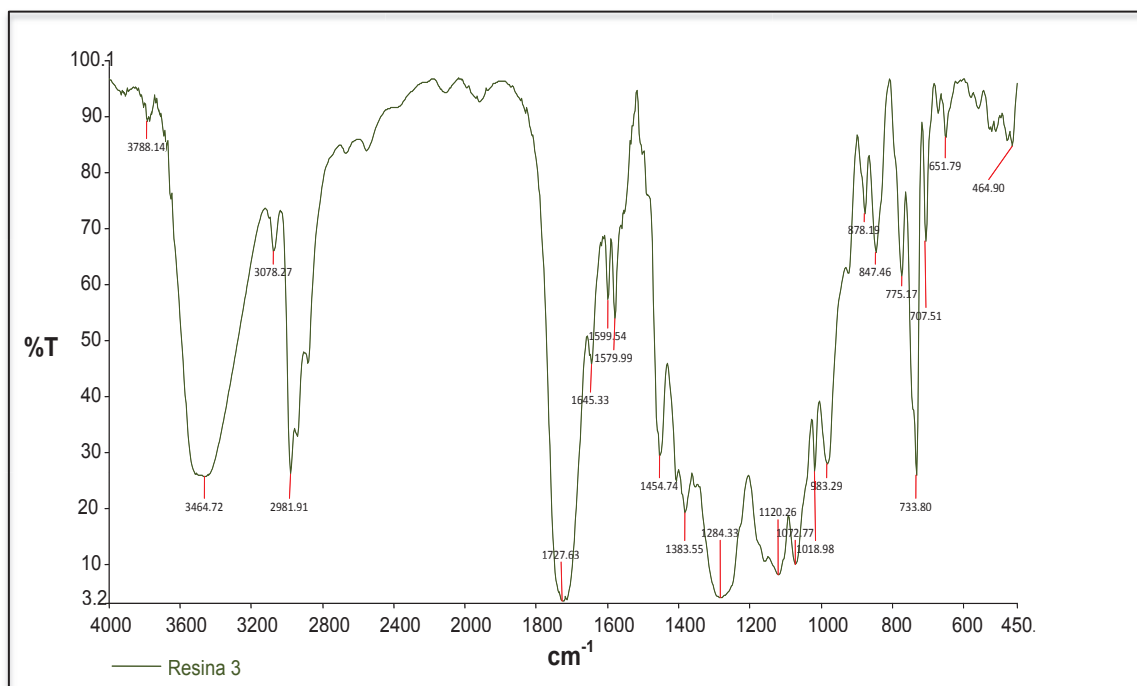


Figura 3.19. Espectro infrarrojo de la resina 3

Tabla 3.10. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la resina 3

Grupo funcional	Número de onda cm ⁻¹	
Alquilo	2 990 - 2 855 1 485 - 1 415	
Alquilo sustitución metilo	2 980 - 2 950 2 885 - 2 865 1 465 - 1 445 1 380 - 1 365	
Hidroxilo sustitución ácido carboxílico o éster	3 500 - 3 350 1 750 - 1 730 1 475 - 1 380	1 300 - 1 200 1140 - 1 080
Hidroxilo	3 540 - 3 200	1 205 - 885
Éster de ácido carboxílico tipo tereftalato	1 735 - 1 710 1 525 - 1 500 1 420 - 1 395 1 280 - 1 250	1115 - 1 005 1 030 - 1 005 885 - 860 735 - 720
Éster de ácido carboxílico tipo ftalato	1 740 - 1 720 1 605 - 1 590 1 585 - 1 570 1 300 - 1 270	1 145 - 1 115 1 085 - 1 065 750 - 730 710 - 690

En la Figura 3.20 se muestra el espectro IR de la resina 5 con una resolución de 4 cm^{-1} y 9 barridos en un rango de 4000 a 400 cm^{-1} .

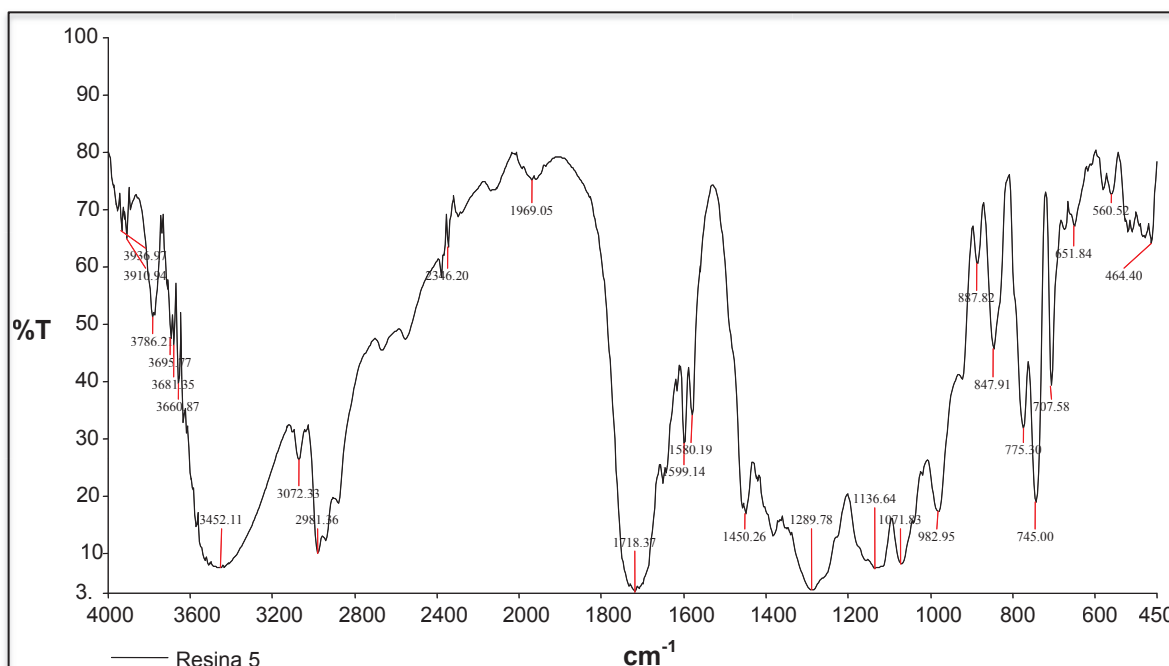


Figura 3.20. Espectro infrarrojo de la resina 5

La resina 5 presenta bandas características de éster de ácido carboxílico tipo ftalato, ya que fue elaborada con material puro (anhídrido ftálico). La presencia de grupos hidroxilo se asocia con el propilenglicol empleado en la síntesis de la resina debido a que este compuesto fue añadido en exceso para evitar la polimerización prematura (gelación) de la resina.

En el análisis de los grupos funcionales presentes se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.11.

En la Tabla 3.12 se muestra un cuadro comparativo de la caracterización de las resinas sintetizadas. La resina 1 que se sintetizó a partir de material reciclado presenta bandas características de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato ya que fue elaborado con ácido tereftálico.

La resina 3 a partir de material reciclado y puro presenta bandas características de éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y tipo ftalato ya que fue elaborado con

ácido tereftálico y anhídrido ftálico. La resina 5 a partir de material puro presenta bandas características de éster de ácido carboxílico tipo ftalato ya que fue elaborado con anhídrido ftálico.

Tabla 3.11. Análisis de grupos funcionales presentes en el espectro de la resina 5

Grupo funcional	Número de onda cm ⁻¹
Alquilo	2 990 - 2 855 1 485 - 1 415
Alquilo sustitución metilo	2 980 – 2 950 2 885 – 2 865 1 465 – 1 445 1 380 - 1 365
Hidroxilo sustitución ácido carboxílico o éster	3 500 - 3 350 1 750 - 1 730 1 475 - 1 380 1 300 - 1 200 1 140 - 1 080
Éster de ácido carboxílico tipo ftalato	1 740 - 1 720 1 605 - 1 590 1 585 - 1 570 1 300 - 1 270 1 145 - 1 115 1 085 - 1 065 750 - 730 710 - 690

Tabla 3.12. Resumen comparativo de la caracterización de las resinas sintetizadas

Resina	Tipo material	Grupo funcional presente	Compuesto empleado
Resina 1	Material reciclado	Éster de ácido carboxílico tipo tereftalato	Ácido tereftálico
Resina 3	Mezcla material reciclado y puro	Éster de ácido carboxílico tipo tereftalato y tipo ftalato	Ácido tereftálico y anhídrido ftálico
Resina 5	Material puro	Éster de ácido carboxílico tipo ftalato	Anhídrido ftálico

3.2.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÁCIDO

La reacción de polimerización para la elaboración de resina poliéster fue llevada a cabo hasta obtener un número ácido con valores menores a 30 mg NaOH / g muestra.

Ciertas resinas presentaban baja viscosidad y además el color era diferente al esperado por lo que se decidió dejar reaccionar un poco más y bajar el número ácido como se observa en la Figura 3.21.

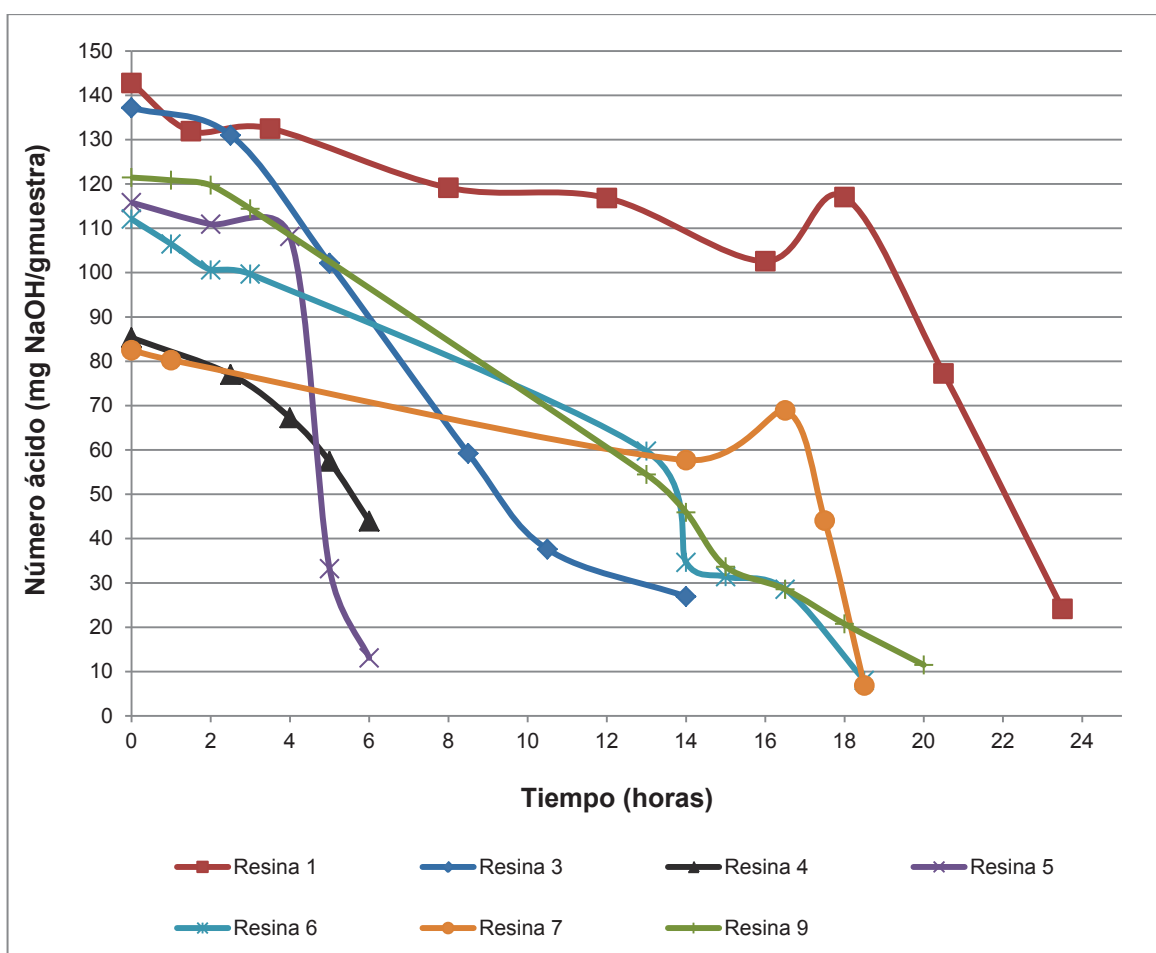


Figura 3.21. Número ácido de las resinas obtenidas

La reacción de la resina 2 y 8 no llegó a su fin debido a que se produjo una polimerización prematura (gelación) y formaron una masa en la superficie interna del reactor. Las resinas 2 y 8 no presentaban cambio de color por lo que se

decidió dejar reaccionar más tiempo, pero en un momento inesperado el número ácido bajo demasiado y no fue posible controlar la reacción. Este fenómeno también fue causado por el exceso de temperatura.

En la Figura 3.22 se observa que el número ácido de las resinas disminuye a medida que se da la reacción. La resina 1 demoró más en alcanzar un número ácido aproximado a 30 mg NaOH /g muestra debido a que la reacción no fue continua y se decidió parar por motivos de seguridad en el laboratorio; al siguiente día se continuó con la reacción. Las demás síntesis se dejaron reaccionar sin interrupción, incluso durante las noches tomando en cuenta medidas de seguridad como agitación segura, flujo de agua de refrigeración adecuado y soportes firmes.

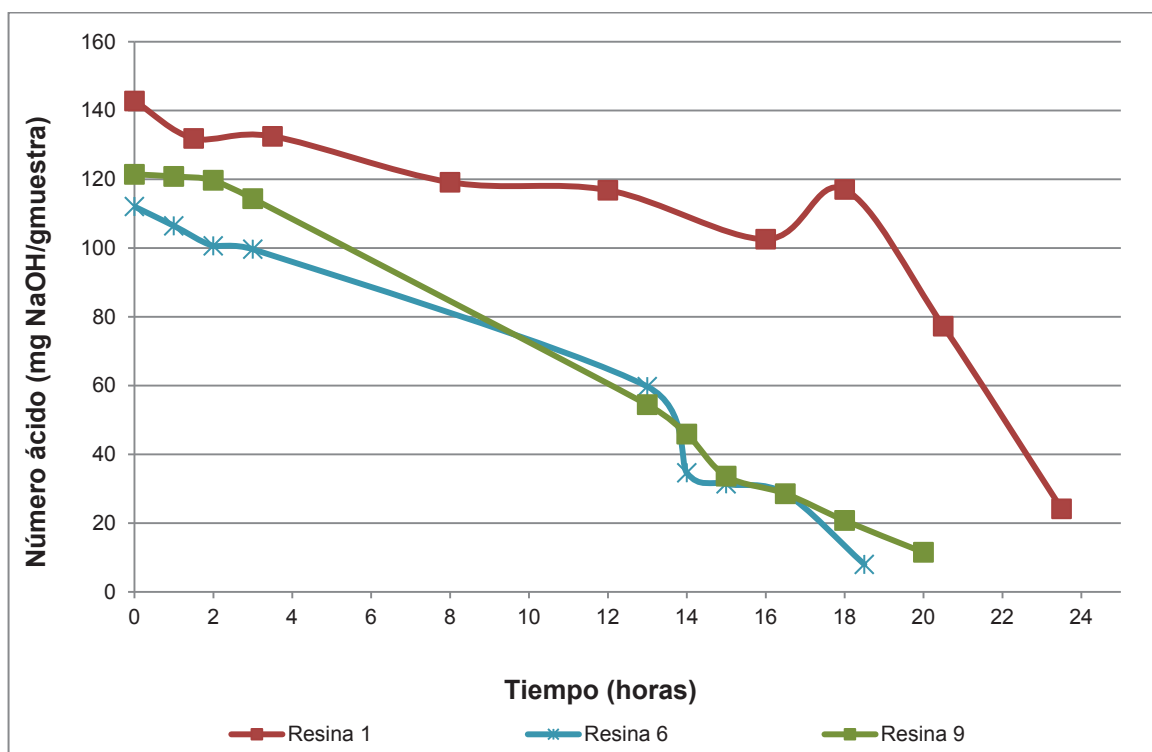


Figura 3.22. Número ácido de las resinas obtenidas a partir de PET reciclado

En la Figura 3.23 se puede observar que la reacción de polimerización para obtener las resinas elaboradas con materiales reciclados tardan más de 18 horas en alcanzar un número ácido aproximado de 30 mg NaOH/ g muestra, mientras que las resinas elaboradas con materiales puros tardan de 5 a 6 horas, esto se debe al anhídrido que forma parte de su composición reacciona más rápido que el

ácido que forma parte de la resina con material reciclado.

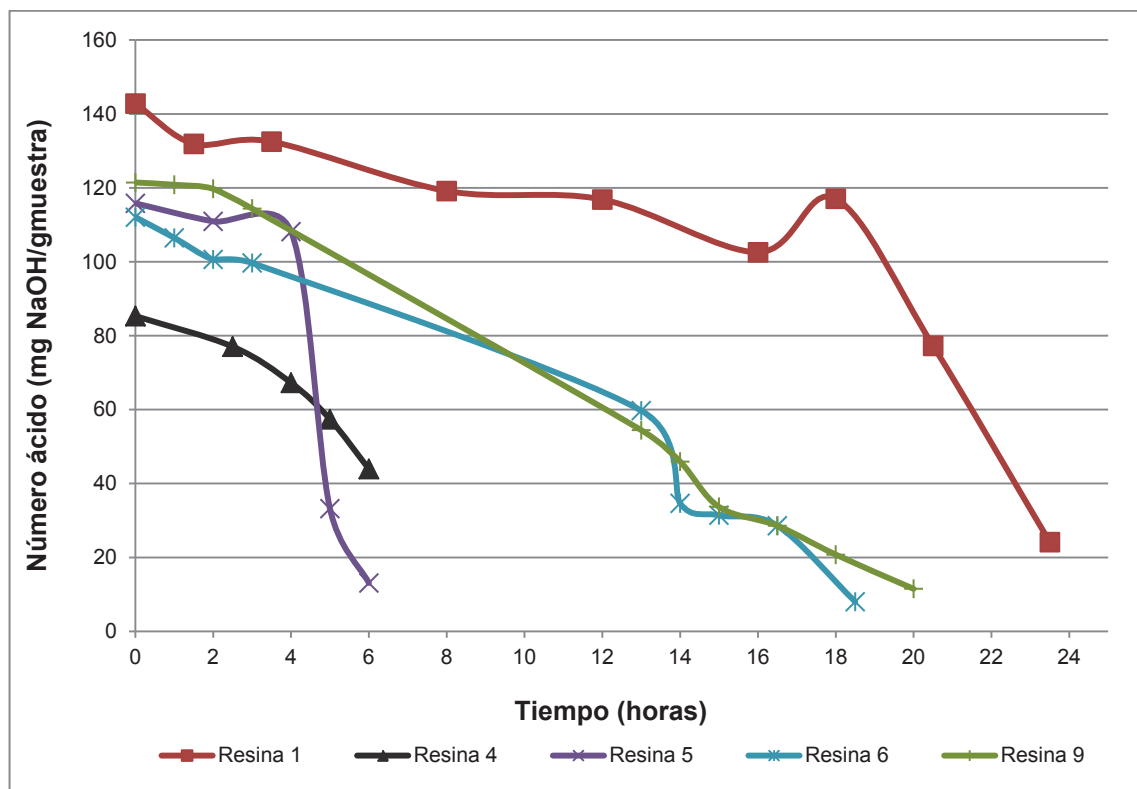


Figura 3.23. Comparación de los números ácidos de las resinas obtenidas con PET reciclado y las resinas obtenidas del material puro

En la Figura 3.24 se puede observar que las resinas elaboradas con materiales puros tardan de 5 a 6 horas en alcanzar un número ácido aproximado de 30 mg NaOH/ g muestra, mientras que las resinas elaboradas con mezcla de material reciclado y puro tardan alrededor de 14 a 18 horas, esto se debe a la composición de las resinas con material puro, el anhídrido reacciona más rápido que el ácido que forma parte de la resina con material reciclado.

En la Figura 3.25 se observa el calentamiento de la mezcla de reacción de las resinas elaboradas con material reciclado y se diferencian dos etapas; la primera etapa consistió en la solubilización y mezcla de los reactivos y se alcanzaron temperaturas entre 120 a 150 °C durante las primeras 10 horas aproximadamente, después se alcanzaron temperaturas entre 190 - 200 °C en la segunda etapa que es la polimerización de la resina que se caracteriza por el aumento de viscosidad y cambio de color.

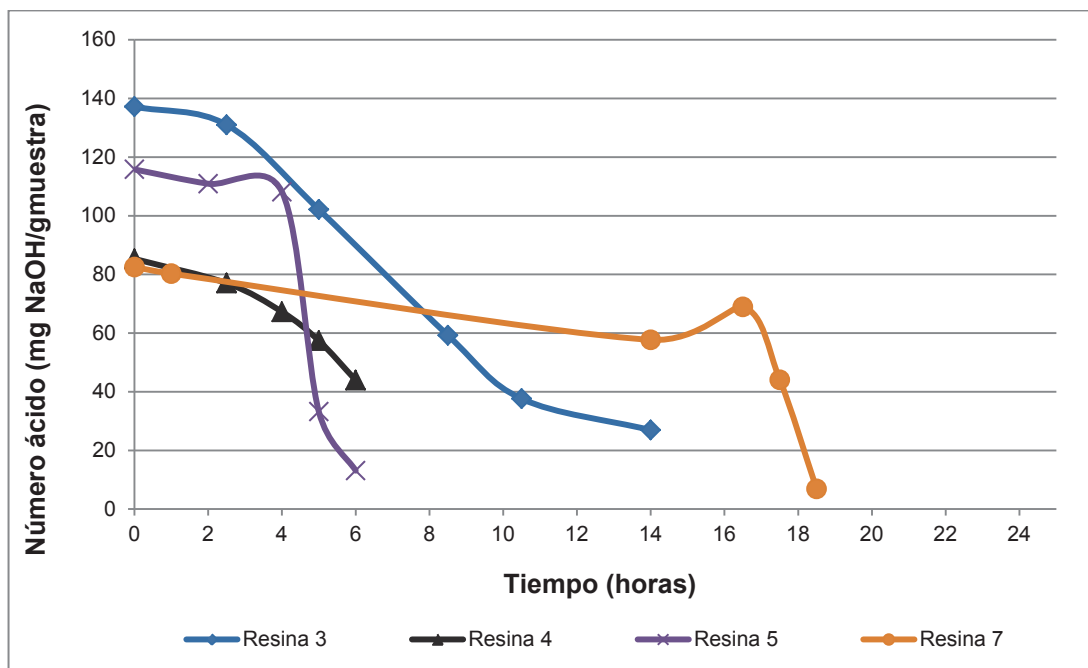


Figura 3.24. Comparación de los números ácidos de las resinas obtenidas con mezcla de material reciclado y puro y las resinas obtenidas del material puro

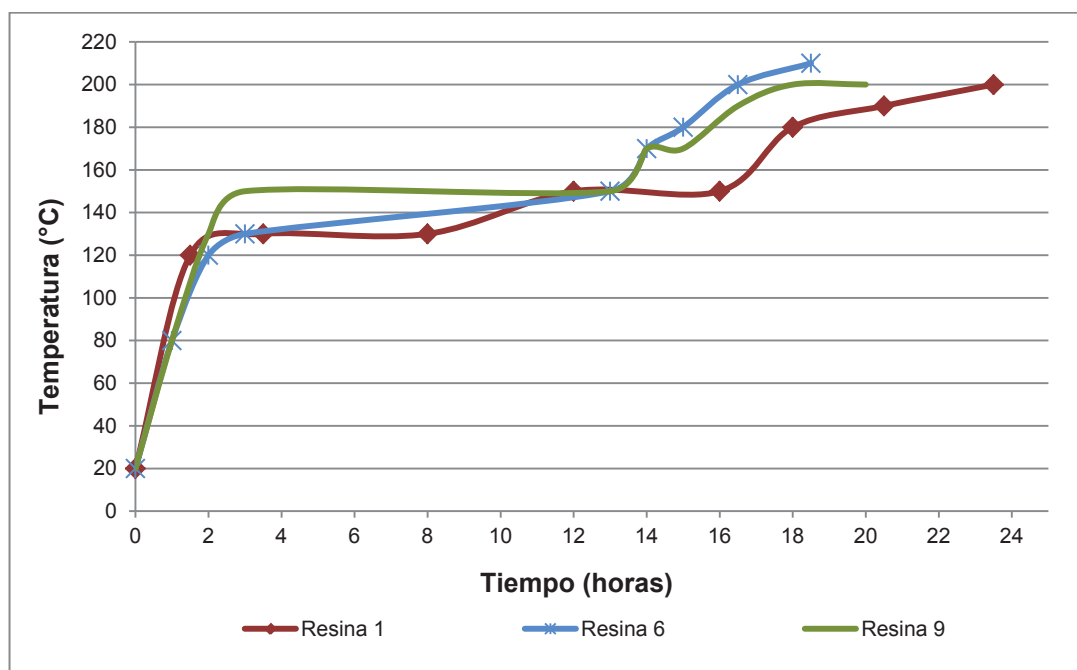


Figura 3.25. Temperatura alcanzada durante la reacción de síntesis de resina poliéster insaturada

Durante la reacción de polimerización es necesario retirar el agua que se forma durante la síntesis de la resina. En la Tabla 3.13 se indica que la cantidad de agua retirada de cada resina fue aproximadamente de 200 ml, excepto en la resina 6.

La formación de agua se produjo con mayor rapidez en la segunda etapa de la reacción que corresponde a la polimerización de la resina, la presencia de agua en el tubo separador del reactor nos indicó que la polimerización se estaba dando con normalidad.

En el ANEXO IV se presenta la composición de cada resina y los datos experimentales obtenidos durante la síntesis de las resinas y los cálculos realizados para determinar el número ácido de las resinas.

Tabla 3.13. Cantidad de agua formada durante la reacción de polimerización

Resina	Composición	V H₂O (ml)
Resina 1	Material reciclado	204,50
Resina 3	Mezcla material reciclado y puro	200,00
Resina 4	Material puro	200,00
Resina 5	Material puro	202,00
Resina 6	Material reciclado	180,00
Resina 7	Mezcla material reciclado y puro	202,00
Resina 9	Material reciclado	206,00

3.2.3 CURADO DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

El tiempo y la temperatura alcanzada en el curado de las resinas poliéster se presenta en la Tabla 3.14. La resina 4 no curó debido a que faltó tiempo de reacción, la reacción fue parada prematuramente con un número ácido de 43 mg NaOH / g muestra por presentar una alta viscosidad. La composición de las resinas influye en el curado de las mismas, las resinas elaboradas con material reciclado demoraron más en curar por un exceso de propilenglicol que se añadió para evitar una gelación de la resina y por la presencia de una parte del ácido tereftálico e isoftálico que no reaccionó. Comparando el ácido tereftálico con el

ácido isoftálico, este último reacciona más lentamente y comparando los anhídridos con los ácidos, estos últimos también reaccionan más lentamente.

La diferente composición de las resinas no impidió que curen gracias a la insaturación del anhídrido maleico que favorece a la reactividad y por tanto al proceso de reticulación ya que permite el entrecruzamiento de las cadenas, sin embargo demoraron más, las resinas compuestas por material puro curaron en 30 min mientras que las resinas con material reciclado curaron entre 60 a 80 min.

El curado es una reacción exotérmica que permite el entrecruzamiento de las cadenas y se utilizó peróxido de metil-etil cetona (MEKP) por lo que se registraron temperaturas aproximadas de 90 °C.

Las superficies de las resinas curadas fueron pegajosas, lo cual fue causado por la atmósfera de oxígeno que inhibió la reacción de reticulación porque los radicales libres del proceso de polimerización son sensibles al oxígeno. (Müller, 1996, p.p. 84-85; Nava, 2004, p.56).

Tabla 3.14. Tiempo y temperatura de curado de las resinas

Resina	Composición	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
Resina 1	Material reciclado	80	90
Resina 3	Mezcla material reciclado y puro	60	89
Resina 4	Material puro	NO CURÓ	
Resina 5	Material puro	30	95
Resina 6	Material reciclado	80	90
Resina 7	Mezcla material reciclado y puro	60	90
Resina 9	Material reciclado	80	91

A continuación se presentan fotografías de las de las resinas poliéster insaturadas curadas en molde de papel aluminio. En la Figura 3.26 se observa la resina

poliéster insaturada 1 curada, elaborada con el producto de la depolimerización del PET.

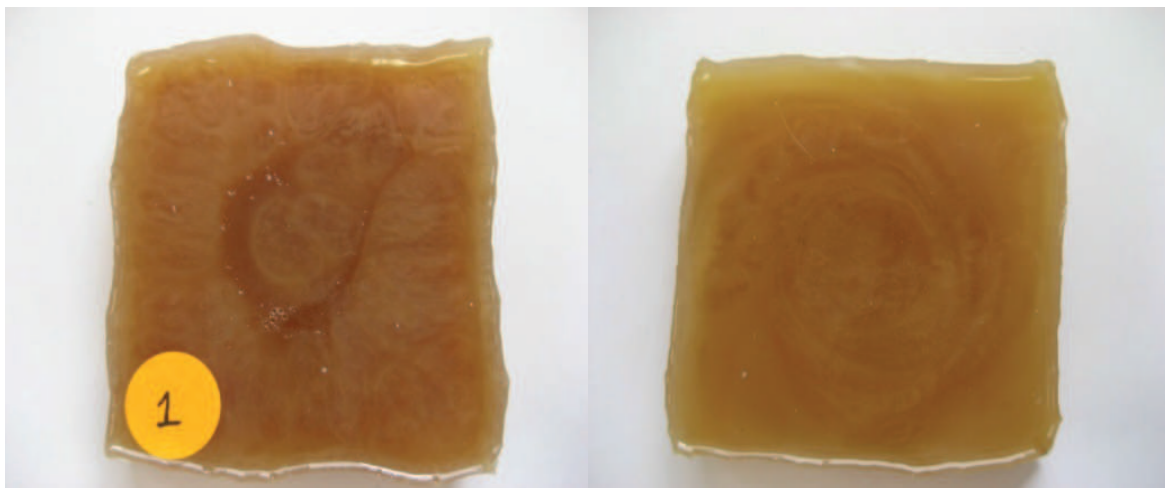


Figura 3.26. Resina 1: Material reciclado

En la Figura 3.27 se observa la resina poliéster insaturada 3 curada, elaborada con el producto de la depolimerización del PET y material puro.

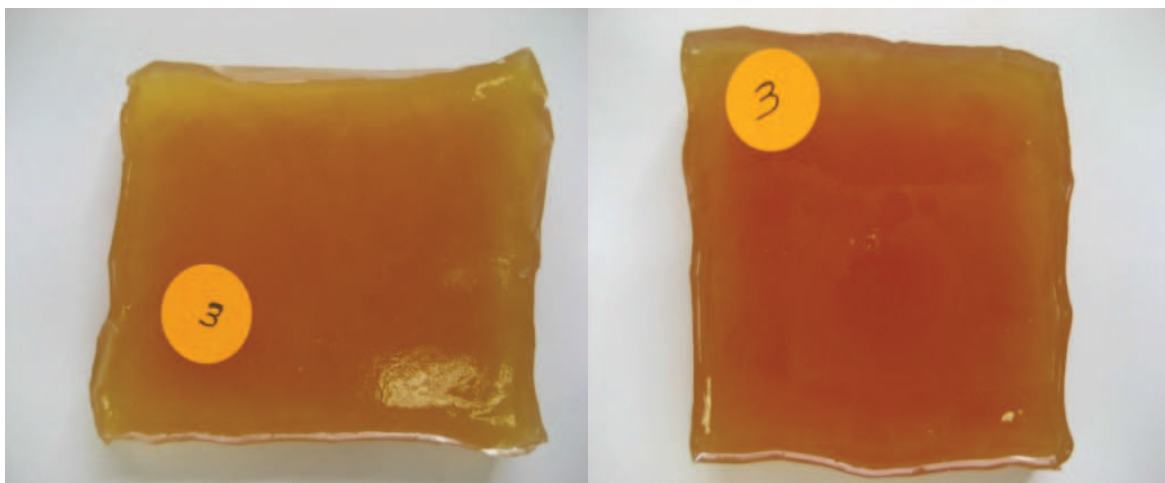


Figura 3.27. Resina 3: Material reciclado y puro

En la Figura 3.28 se observa la resina poliéster insaturada 5 curada, elaborada con material puro (anhídrido ftálico).

En la Figura 3.29 se observa la resina poliéster insaturada 6 curada, elaborada con el producto de la depolimerización del PET.

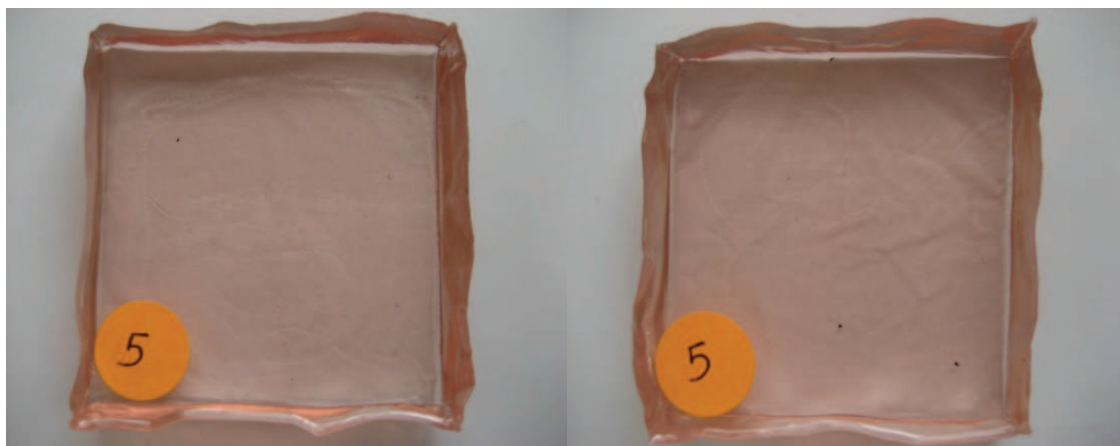


Figura 3.28. Resina 5: Material puro

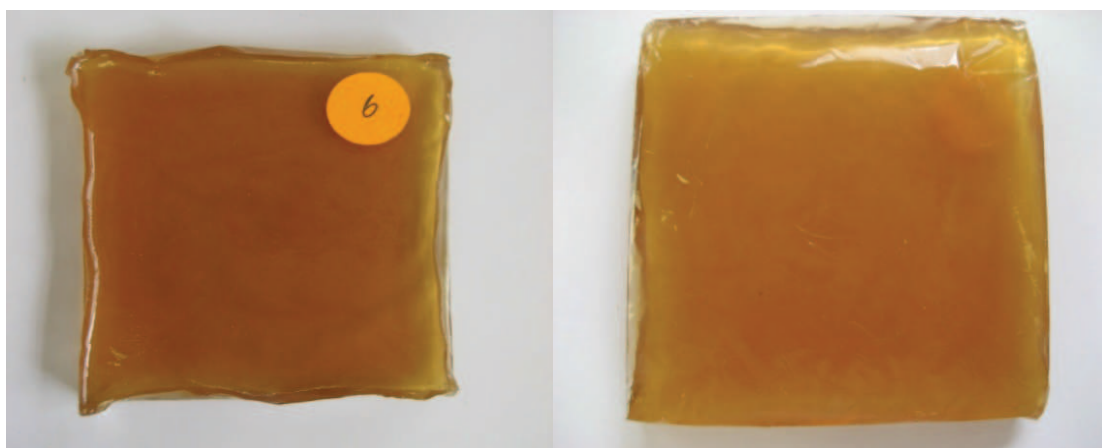


Figura 3.29. Resina 6: Material reciclado

En la Figura 3.30 se observa la resina poliéster insaturada 7 curada, elaborada con el producto de la depolimerización del PET y material puro.

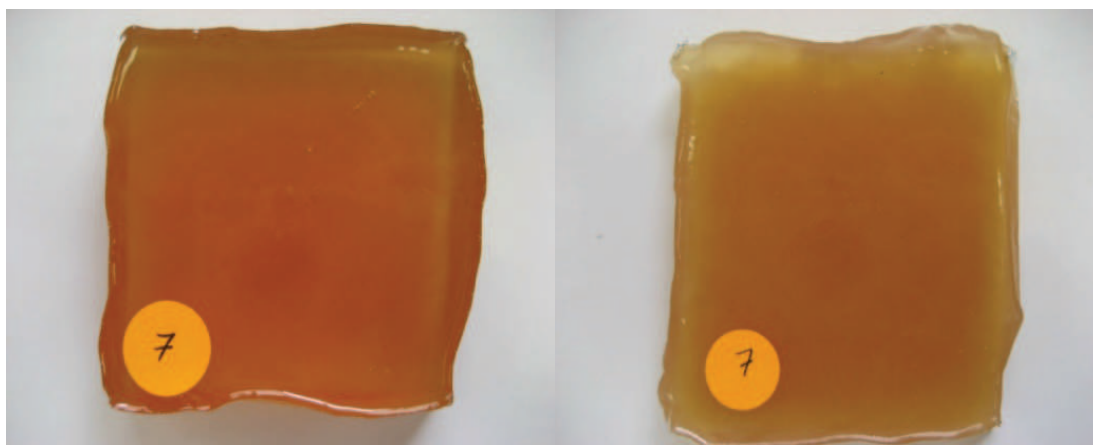


Figura 3.30. Resina 7: Material reciclado y puro

En la Figura 3.31 se observa la resina poliéster insaturada 9 curada, elaborada con el producto de la depolimerización del PET.

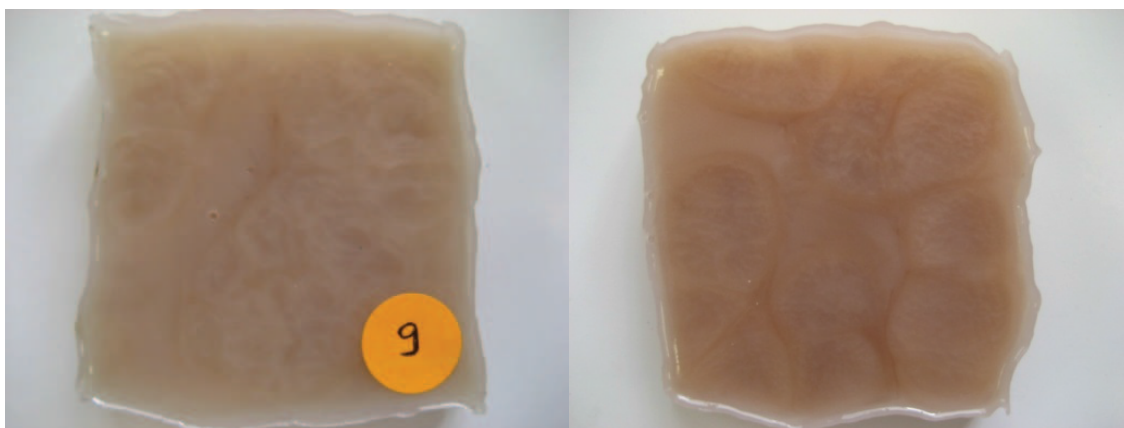


Figura 3.31. Resina 9: Material reciclado

En la Figura 3.32 se observa una resina poliéster insaturada comercial curada.

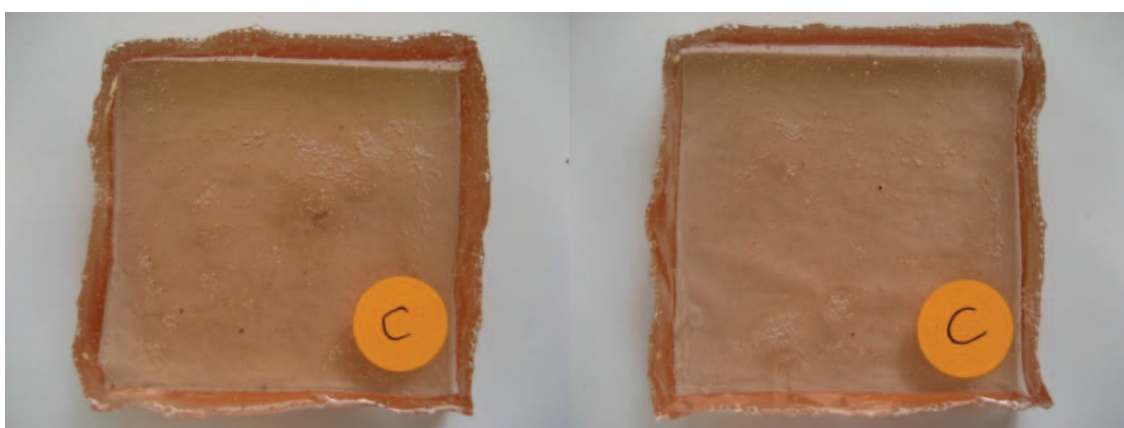


Figura 3.32. Resina comercial

3.3 EVALUACIÓN DE LA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

3.3.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SÓLIDOS

El porcentaje de sólidos de las resinas determinado mediante la norma ASTM D 2369 - 10, se muestra en la Tabla 3.15. La resina 1 presenta menor porcentaje de sólidos debido al envase en el que se almacenó ya que se produjo una leve evaporación del solvente (estireno).

Tabla 3.15. Porcentaje de sólidos

Resinas	% Sólidos
1	58,51
3	63,74
4	60,54
5	65,19
6	62,63
7	63,74
9	63,41
Promedio	62,54

La variación en los porcentajes de sólidos de las resinas se debe a varios factores:

- Los cálculos para determinar la cantidad del estireno fueron realizados considerando la masa reaccionante y la cual incluía la cantidad de propilenglicol en exceso que se añadió para evitar una gelación de la resina, pero cierta parte del propilenglicol en exceso se perdió durante el proceso de polimerización.
- El estireno fue añadido a la resina a aproximadamente 90 °C, incluso fue añadido lentamente pero pudo existir una leve evaporación del solvente.
- Sin embargo, las resinas curaron y muestran un porcentaje aceptable de sólidos que se encuentra dentro del rango aceptado para una resina comercial 64 a 67 % de acuerdo con la ficha técnica de una resina poliéster que se presenta en el ANEXO V.

3.3.2 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA

En la Tabla 3.16 se muestra la dureza de las resinas determinada mediante la norma D 2240 - 05. La dureza se encuentra sobre el valor de una resina comercial que corresponde a un valor de 40 como se presenta en la ficha técnica

de una resina poliéster en el ANEXO V.

La composición de las resinas influye en las propiedades finales del producto reticulado, en este caso la dureza de las resinas. El anhídrido ftálico y el propilenglicol utilizados en la síntesis, proporciona rigidez y fragilidad a la resina curada.

Tabla 3.16. Dureza de las resinas

Resina	Dureza
1	51,9
3	46,1
5	46,4
6	47,7
7	49,4
9	48,4
Promedio	48,3

3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR PARA LA DEPOLIMERIZACIÓN DE DESECHOS DE PET Y DEL REACTOR PARA LA POLIMERIZACIÓN DE RESINA DE POLIÉSTER INSATURADA

3.4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR PARA LA DEPOLIMERIZACIÓN DE DESECHOS DE PET

Se seleccionó un reactor tipo batch ya que los reactivos serán cargados cada vez que se realice la depolimerización del PET, que requiere de un tiempo determinado de reacción de toda la masa.

El volumen es de 2 m³, es el reactor más utilizado a pequeña escala de producción. La temperatura de operación será la temperatura de ebullición del etilenglicol a condiciones atmosféricas como se indica en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Condiciones de operación del reactor para la depolimerización del PET

Temperatura	187 °C
Presión	0,72 atm
Relación g PET/ ml EG	0,4

3.4.1.1 Dimenisonamiento del reactor

El dimensionamiento de los reactores de depolimerización y polimerización se lo realizó con la aplicación del código ASME sección VIII división 1, por ser la norma más conocida y de uso a nivel mundial.

En la Tabla 3.18 se presenta las dimensiones del reactor para la depolimerización que consta de tres partes: recipiente cilíndrico, fondo y tapa.

El material del reactor se escogió tomando en cuenta que tanto los reactivos como los productos son sustancias corrosivas, por lo que se seleccionó el acero inoxidable austenítico AISI 316 L como material para el reactor y el agitador, este material es de gran aplicación en la industria química.

La forma de la tapa y fondo escogida fue de cabeza torisférica que se indica en la Figura 3.33, por ser una de las formas más fáciles y conocidas para diseñar y construir (Reinforce Plastic, 2012).

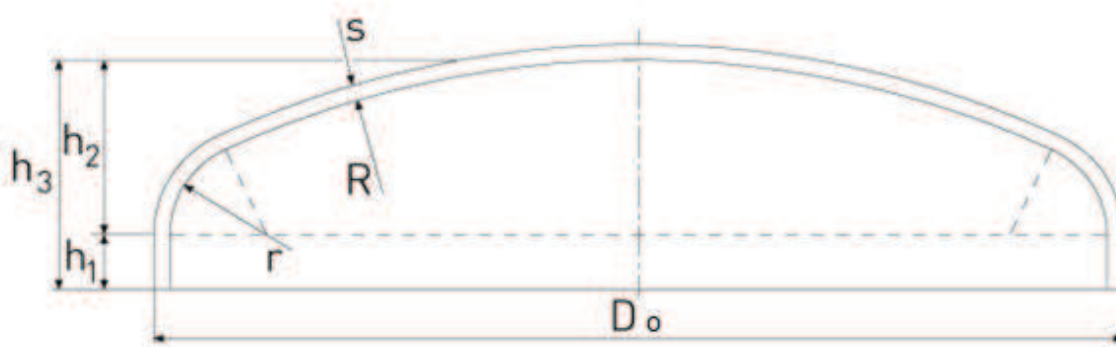


Figura 3.33. Cabeza torisférica
(Weisstaler, 2013)

Tabla 3.18. Dimensiones del reactor de depolimerización

Tipo reactor	Batch
Material	Acero AISI 316 L
Recipiente cilíndrico	
Altura H	1,554 m
Diámetro interno D	1,295 m
Espesor e	0,006 m
Fondo y tapa	
Cabeza Torisférica	
Dimensiones fondo	
R	1,295 m
r	0,129 m
h1	0,021 m
h2	0,249 m
h3	0,270 m
S	0,006 m
Dimensiones Tapa	
R	1,295 m
r	0,129 m
h1	0,018 m
h2	0,250 m
h3	0,267 m
S	0,005 m

3.4.1.2 Sistema de agitación

La selección del agitador se definió a partir del volumen y la viscosidad del líquido como se indica en la Figura 3.34. El agitador escogido fue tipo turbina de 4 palas por ser un agitador eficaz, muy conocido y empleado en la industria.

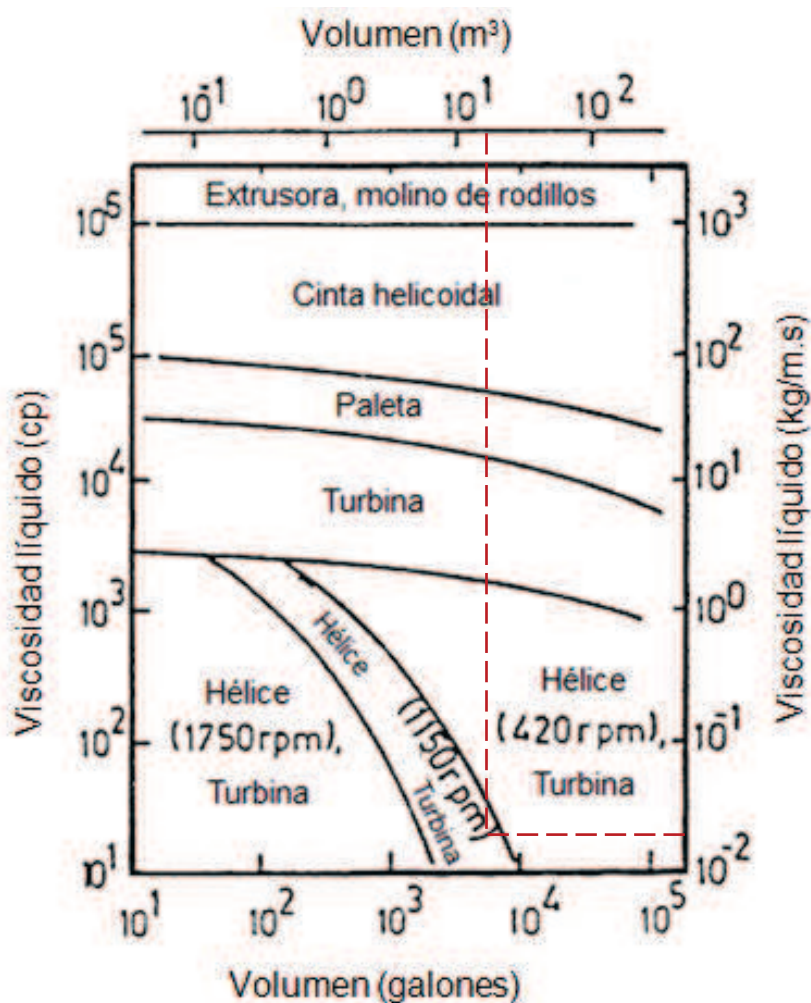


Figura 3.34. Determinación del tipo de agitador para el reactor de depolimerización (Coker, 2001, p. 562)

Las dimensiones del agitador se determinaron con base en proporciones típicas para un agitador tipo turbina que se presentan en la en la Tabla 3.19.

En la Figura 3.35 se presenta el agitador tipo turbina que se utilizó para el sistema de agitación de los reactores.

Tabla 3.19. Proporciones típicas para el diseño de un agitador tipo turbina

$\frac{D_a}{D} = \frac{1}{3}$	$\frac{w}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{H}{D_t} = 1$
$\frac{E}{D_a} = 1$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$

(Harriott, McCabe y Smith, 1998, p. 251)

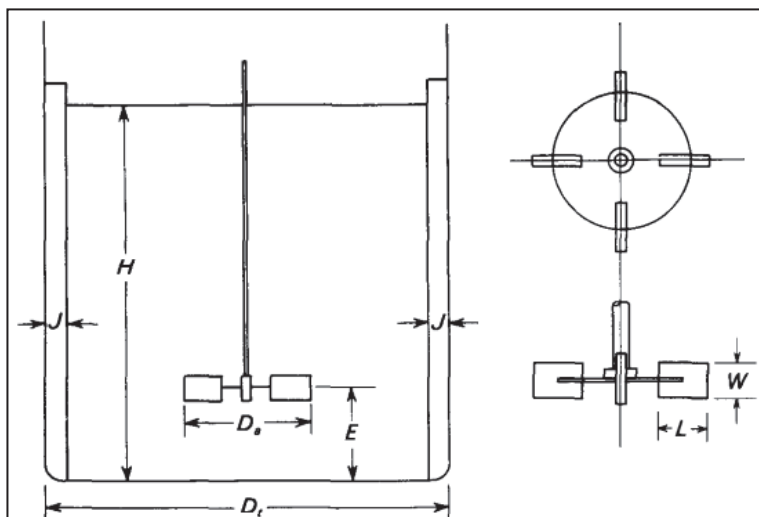


Figura 3.35. Agitador tipo turbina
(Harriott et al, 1998, p. 251)

En la Tabla 3.20 se encuentra las dimensiones del agitador para el reactor de depolimerización del PET.

Tabla 3.20. Dimensiones del sistema de agitación

Tipo agitador	Turbina 4 palas
Material	Acero AISI 316
R	4
Da	0,432 m
J	0,108 m
W	0,086 m
L	0,108 m
E	0,432 m
H	1,295 m
Velocidad agitador	150 rpm
Potencia requerida	1,713 KW

3.4.1.3 Sistema de calentamiento

En la Tabla 3.21 se detalla el sistema de calentamiento del reactor para la depolimerización del PET.

Tabla 3.21. Sistema de calentamiento

Tipo	Camisa con deflectores
Material	AISI 316
Coeficiente global de transferencia de calor U	127,0 W/m ² K
Aérea de transferencia A	7,4 m ²
Fluido	Aceite Dowtherm G
Temperatura fluido	195 °C

3.4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR PARA LA POLIMERIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA

Para el proceso de polimerización también se seleccionó un reactor tipo batch ya que el producto será descargado al alcanzar un número ácido aproximado a 30 mg NaOH/g muestra y una viscosidad adecuada para su comercialización, las condiciones de operación del reactor para la polimerización se indican en la Tabla 3.22. El volumen del reactor es de 1,36 m³.

Tabla 3.22. Condiciones de operación del reactor para la polimerización

Temperatura máxima	220 °C
Presión	0,72 atm
Relación COOH/ OH	1,10

3.4.2.1 Dimensionamiento del reactor

En la Tabla 3.23 se presenta las dimensiones del reactor para la depolimerización que consta de tres partes: recipiente cilíndrico, fondo y tapa.

Tabla 3.23. Dimensionamiento del reactor de polimerización

Tipo reactor	Batch
Material	Acero ASI 316 L
Recipiente cilíndrico	
Altura H	1,356 m
Diámetro interno D	1,130 m
Espesor e	0,006 m
Fondo y tapa	
Cabeza Torisférica	
Dimensiones fondo	
R	1,130 m
r	0,113 m
h1	0,021m
h2	0,217 m
h3	0,238 m
S	0,006 m
Dimensiones Tapa	
R	1,130 m
r	0,113 m
h1	0,018 m
h2	0,218 m
h3	0,235 m
S	0,005 m

3.4.2.2 Sistema de agitación

La selección del agitador se definió a partir del volumen y la viscosidad del líquido como se indica en la Figura 3.36. El agitador escogido fue tipo turbina de 4 palas por ser un agitador eficaz, muy conocido y empleado en la industria.

En la Tabla 3.24 se encuentra las dimensiones del agitador para el reactor de polimerización de la resina poliéster.

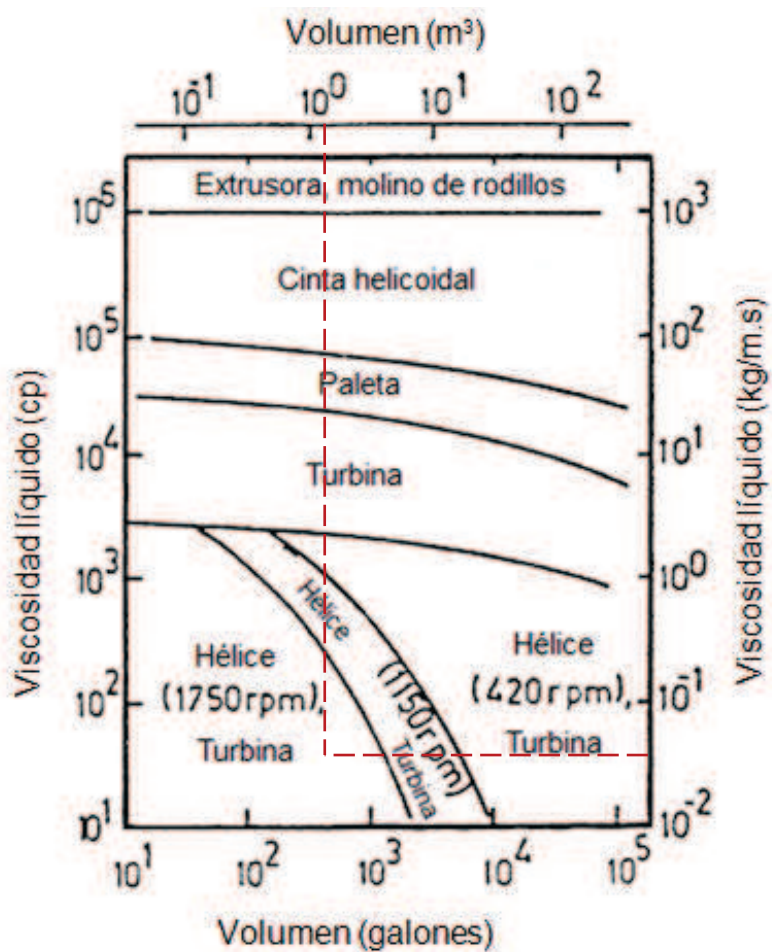


Figura 3.36. Determinación del tipo de agitador para el reactor de polimerización
(Coker, 2001, p. 562)

Tabla 3.24. Diseño del sistema de agitación

Tipo agitador	Turbina
Material	Acero ASI 316
R	4
Da	0,377 m
J	0,094 m
W	0,075 m
L	0,094 m
E	0,377 m
H	1,130 m
Velocidad agitador	150 rpm
Potencia requerida	1,189 KW

3.4.2.3 Sistema de calentamiento

En la Tabla 3.25 se detalla el sistema de calentamiento del reactor para la síntesis de la resina poliéster insaturada del PET.

Tabla 3.25. Sistema de calentamiento

Tipo	Camisa
Material	AISI 316
Coeficiente global de transferencia de calor U	118,94 W/m ² K
Aérea de transferencia A	5,62 m ²
Fluido	Aceite Dowtherm G
Temperatura fluido	215 °C

En el ANEXO VI se encuentra los cálculos para el dimensionamiento del reactor de depolimerización y reactor de polimerización.

3.4.3 DISEÑO DEL PROCESO Y PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCIÓN DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA MEDIANTE EL RECICLAJE QUÍMICO DE DESECHOS DE POLIETILENTEREFTALATO

3.4.3.1 Ingeniería conceptual

Definición del producto

Se realizó el diseño del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de PET. La resina será comercializada en presentaciones de 25 kg.

Campo de aplicación

La resina poliéster insaturada puede ser utilizada en las siguientes aplicaciones (Czub et al, 2005, p. 5; Weatherhead, 1980, p.140).

- En la industria del plástico reforzado
- Fabricación de botones
- Producción de mármol sintético
- Productos para el transporte y aplicaciones marinas.
- Revestimientos y acabados como lacas, cementos y pegamentos piezas fundidas como cuchillos y mangos de paraguas
- Materiales reforzados para la manufactura de sanitarios, tubos y paneles.

Disponibilidad de materia prima

La provisión de las materias primas será por medio de empresas a nivel nacional. Las botellas de PET recicladas serán suministradas por la empresa RECICLAR S.A localizada en la ciudad de Quito.

Las botellas recicladas son comercializadas en pacas de 500 kg. En cuanto a los glicoles, existen algunas empresas que se dedican a la comercialización de estas materias primas como: DISAN S.A, REUSE S.A. El anhídrido maléico será suministrado por la empresa REUSE S.A.

Capacidad

La capacidad de producción de la planta se determinó tomando en cuenta las importaciones de PET en el año 2011, que según los datos oficiales del Banco Central del Ecuador fueron aproximadamente 47 000 Tn. El 20 % corresponde a 9 400 Tn que será reutilizado. Una planta industrial procesaría el 20 % que corresponde aproximadamente a 1 800 Tn del material post-consumo.

Para el diseño del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de PET, se consideró una producción del 10 % del material disponible reciclado y corresponde a 180 Tn al año, lo cual sería 500 kg/día.

Localización

Esta decisión se fundamentó en un análisis ponderativo, basado en la posibilidad de situar la planta en tres diferentes lugares. La ponderación se realizó debido al grado de importancia de cada uno de los factores como si indica en la Figura 3.37.



Figura 3.37. Ponderación de localización de la planta

La puntuación se realizó sobre la base de la factibilidad de que se dé determinada actividad de la siguiente manera: Alta 3. Mediana 2 y Baja 1.

Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 3.26.

Se consideraron 3 posibles provincias para la ubicación de la planta; Guayas, Pichincha y Santo Domingo. Del análisis ponderativo y en vista de que la materia prima principal que son las botellas de PET se encuentra en la ciudad de Quito y las demás material primas como el propilenglicol, etilenglicol y anhídrido maléico son distribuidas a nivel nacional.

Se decidió ubicar la planta en la provincia de Pichincha, por la facilidad de transporte y abastecimiento de la materia prima, cuenta con los servicios básicos como energía eléctrica y agua potable y seguridad.

La planta se localizará en una de las nuevas zonas industriales de Quito, en el sector Itulcachi vía Pifo-Pintag cerca al nuevo aeropuerto, como se indica en la Figura 3.38.

Tabla 3.26. Resultados del análisis de ponderación de la localización

Ponderación	Factores	Guayas	Pichincha	Santo Domingo
20	Disponibilidad de materia prima	3	3	2
10	Facilidad de transporte	3	2	3
7	Fuerza laboral	3	2	3
20	Mercado	3	3	1
7	Restricciones legales y laborales	2	3	2
10	Disponibilidad de energía	3	3	1
10	Suministro de agua	2	3	1
3	Aceptación de la comunidad	2	3	1
2	Características del sitio	1	3	1
3	Clima	1	3	2
4	Protección contra el fuego e inundaciones	3	3	2
4	Eliminación de desechos	2	2	1
100	Total	2,66	2,79	1,68



Figura 3.38. Localización de la planta piloto
(Google, 2013)

3.4.3.2 Ingeniería básica

Descripción del proceso

Recepción de la materia prima: La materia prima consiste en material de desecho, en este caso las botellas de PET. Las botellas de PET serán adquiridas por pacas de 500 kg.

Selección y separación: La selección de las botellas será un proceso manual y se considerará mediante criterios de color, impurezas existentes como metales, materia orgánica, etc. y separación de otros plásticos como el PVC, PP, PE con el fin de obtener un producto más selectivo de acuerdo con nuestras necesidades.

Reducción de tamaño: La reducción de tamaño de las botellas de PET se lo hará con molinos cuchillas, el tamaño de las escarchas de PET será de 5mm.

Lavado y secado: Se empleará una solución diluida de hidróxido de sodio a una temperatura ambiente para evitar cualquier posible degradación térmica del

PET. Las escamas de PET molidas serán secadas a 90 °C y posteriormente almacenadas en un tanque para sólidos.

Depolimerización: Se procesará 500 kg/día de escama de PET mediante una glicólisis alcalina para lo cual se utilizará etilenglicol e hidróxido de sodio. La reacción se llevara a cabo a temperatura de ebullición del glicol y presión atmosférica. EL reactor constará de un sistema de calentamiento y agitación mecánica. Las condiciones de operación se detallan en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Condiciones de operación para el proceso de depolimerización

Tipo proceso	Batch
Temperatura	187 °C
Carga total	2000 kg
Tiempo	4 horas

Solubilización: La mezcla de reacción será solubilizada con agua destilada en un tanque con agitación.

Filtrado: Se filtrará el PET que no reaccionó y las impurezas presentes para evitar contaminar en el producto final.

Precipitación: En un tanque con agitación, se hará precipitar el producto de la glicólisis mediante la adición de una solución 1:2 de ácido clorhídrico, hasta alcanzar un pH=1.

Filtración y secado: El producto sólido obtenido será secado durante 4 horas a 90 °C, para eliminar el agua y exceso de solventes. Se almacenará un tanque para sólidos.

Polimerización: Se dimensionará el reactor para la polimerización de la resina poliéster insaturada. EL reactor constará de un sistema de calentamiento y condensado, agitación mecánica y suministro de gas inerte. Las condiciones de operación se detallan en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Condiciones de operación para el proceso de polimerización

Tipo proceso	Batch
Temperatura	187 °C
Carga total	1390 kg

Diagramas BFD

En la Figura 3.39 se muestra el diagrama de bloques (BFD) del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET).

Balance de masa del proceso

En la Figura 3.40 se presenta el balance de masa para la obtención de la resina poliéster insaturada.

Los cálculos del balance de masa del proceso se encuentran en el ANEXO VII.

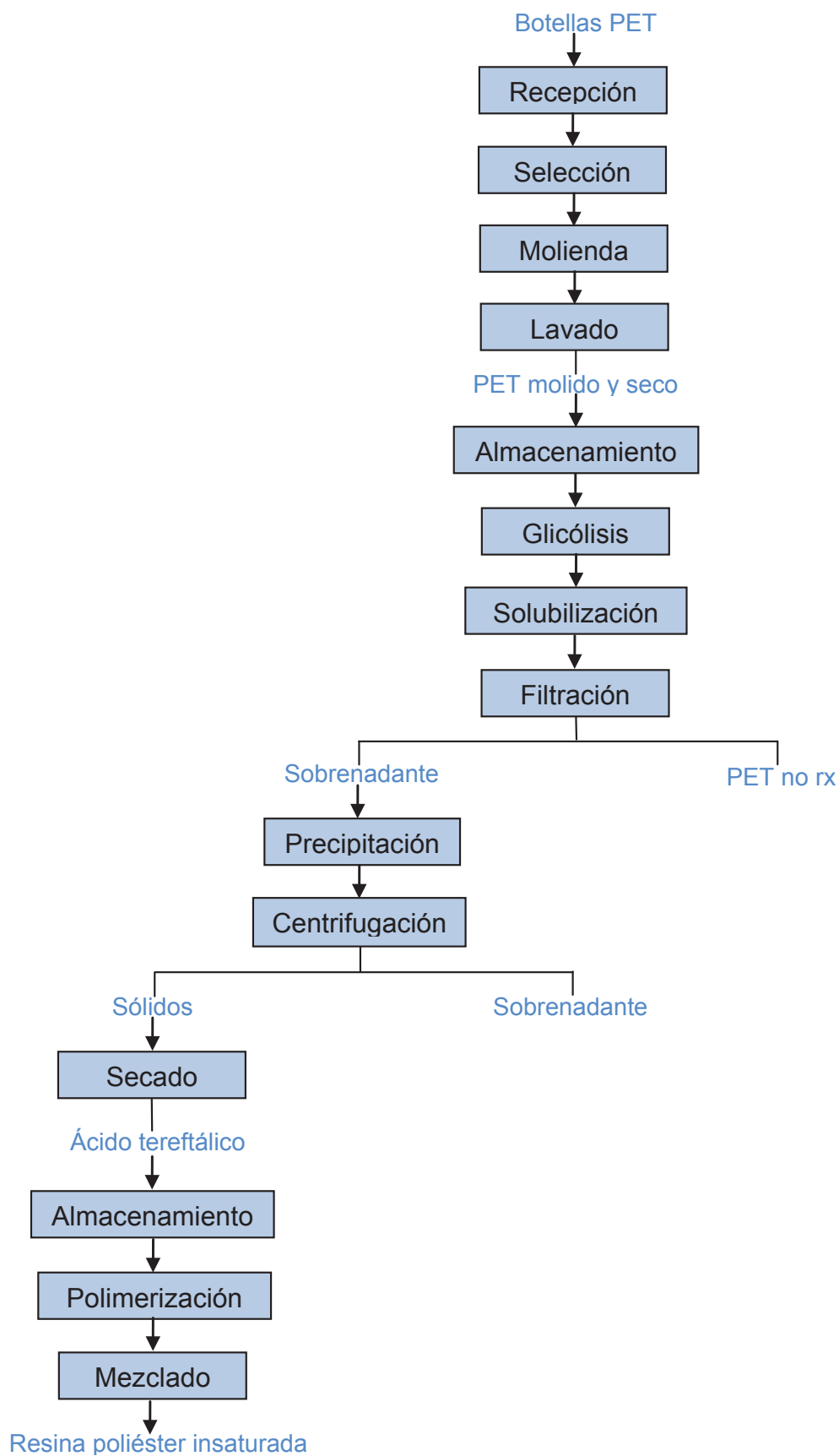


Figura 3.39. Diagrama de bloques (BFD) del proceso para la obtención de resina poliéster

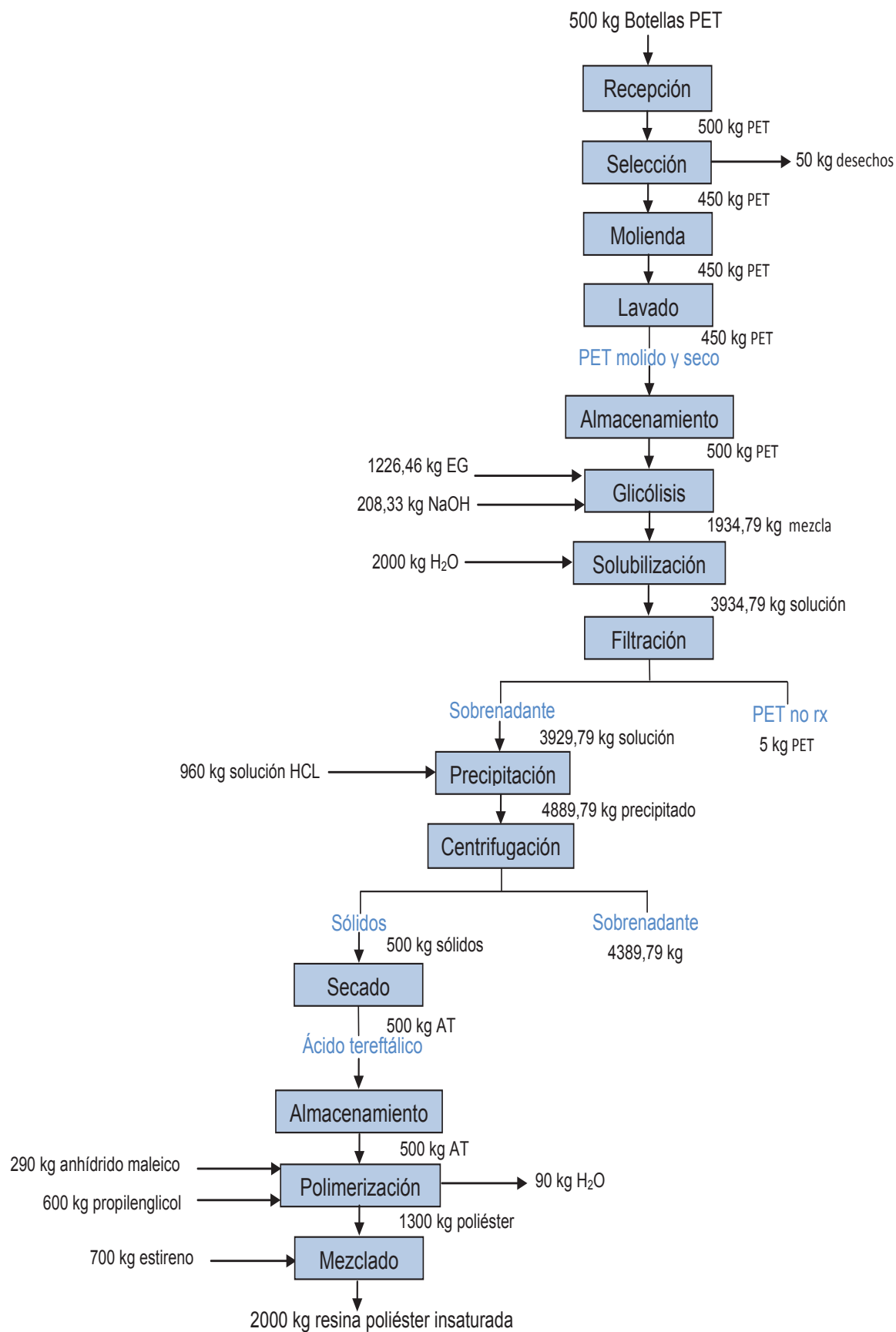


Figura 3.40. Balance de masa del proceso de obtención de resina poliéster

Equipos seleccionados para el proceso

Los equipos seleccionados para el proceso de obtención de la resina poliéster a partir del reciclaje químico de las botellas de PET se presentan en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29. Lista de equipos seleccionados para el proceso de obtención de resinas poliéster insaturada

Equipo	Código
Banda transportadora	BP-101
Molino de cuchillas	MP-102
Lavadora	LP-103
Secador 1	SP-104
Silo almacenamiento	AP-204
Reactor depolimerización	RG-301
Tanque agitado 1	TA-302
Filtro	FA303
Tanque agitado 2	TA-304
Centrífuga	CA-305
Secador 2	SA-306
Silo almacenamiento	AA-401
Reactor polimerización	RP-501
Tanque agitado 3	TR-502
Tanque almacenamiento	AR-503

En el ANEXO VIII se encuentran los cálculos realizados para el dimensionamiento de los tanques de almacenamiento del PET molido, del ácido tereftálico y de la resina poliéster insaturada.

En la Tabla 3.30 se observa las dimensiones de los equipos seleccionados, medidas que se tomaron en cuenta para la elaboración del plano de distribución en planta (lay out).

En el ANEXO IX se presentan las hojas de especificación de los equipos seleccionados para el proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET).

Tabla 3.30. Dimensiones de los equipos seleccionados para el proceso de obtención de resinas poliéster insaturada

Equipo	Dimensiones		
	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)
Banda transportadora	8,00	0,80	1,00
Molino de cuchillas	1,50	1,60	1,80
Lavadora	1,30	1,30	1,80
Secador 1	2,0	0,8	1,7
Silo almacenamiento	0,80	0,80	2,40
Reactor depolimerización	1,30	1,30	1,50
Tanque agitado 1	1,70	1,70	2,00
Filtro	1,3	1	1,2
Tanque agitado 2	2,00	2,00	2,20
Centrífuga	1,49	1,13	1,48
Secador 2	1,70	0,80	1,70
Silo almacenamiento	0,78	0,78	1,56
Reactor polimerización	1,30	1,30	1,50
Tanque agitado 3	1,50	1,50	1,70
Tanque almacenamiento	1,07	1,07	1,6

Consumo energético del proceso

En la Tabla 3.31 se muestran los equipos a utilizarse en la planta con su respectivo consumo energético.

Tabla 3.31. Consumo energético de los equipos seleccionados para el proceso

Equipo	Potencia demandada (kw)	Horas de funcionamiento al día (h/día)	Energía demandada (kwh/día)
Línea de triturado-lavado-secado	55,00	3,00	165,00
Reactor depolimerización	5,50	4,00	22,00
Tanque mezclador	5,50	0,50	2,75
Tanque mezclador	11,00	1,00	11,00
Centrífuga	7,50	4,00	30,00
Secador	5,00	6,00	30,00
Reactor polimerización	5,50	18,00	99,00
Tanque mezclador	5,00	0,50	2,50
Total	100,00		362,25

Diagramas PFD

En la Figura 3.41 se muestra el diagrama de flujo (PFD) del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET).

Plano de distribución en planta (Lay out)

En la Figura 3.42 se muestran el plano de distribución de la planta piloto. La planta tendrá un área de 984 m², incluyendo el área de la planta, oficinas, parqueaderos y espacios verdes.

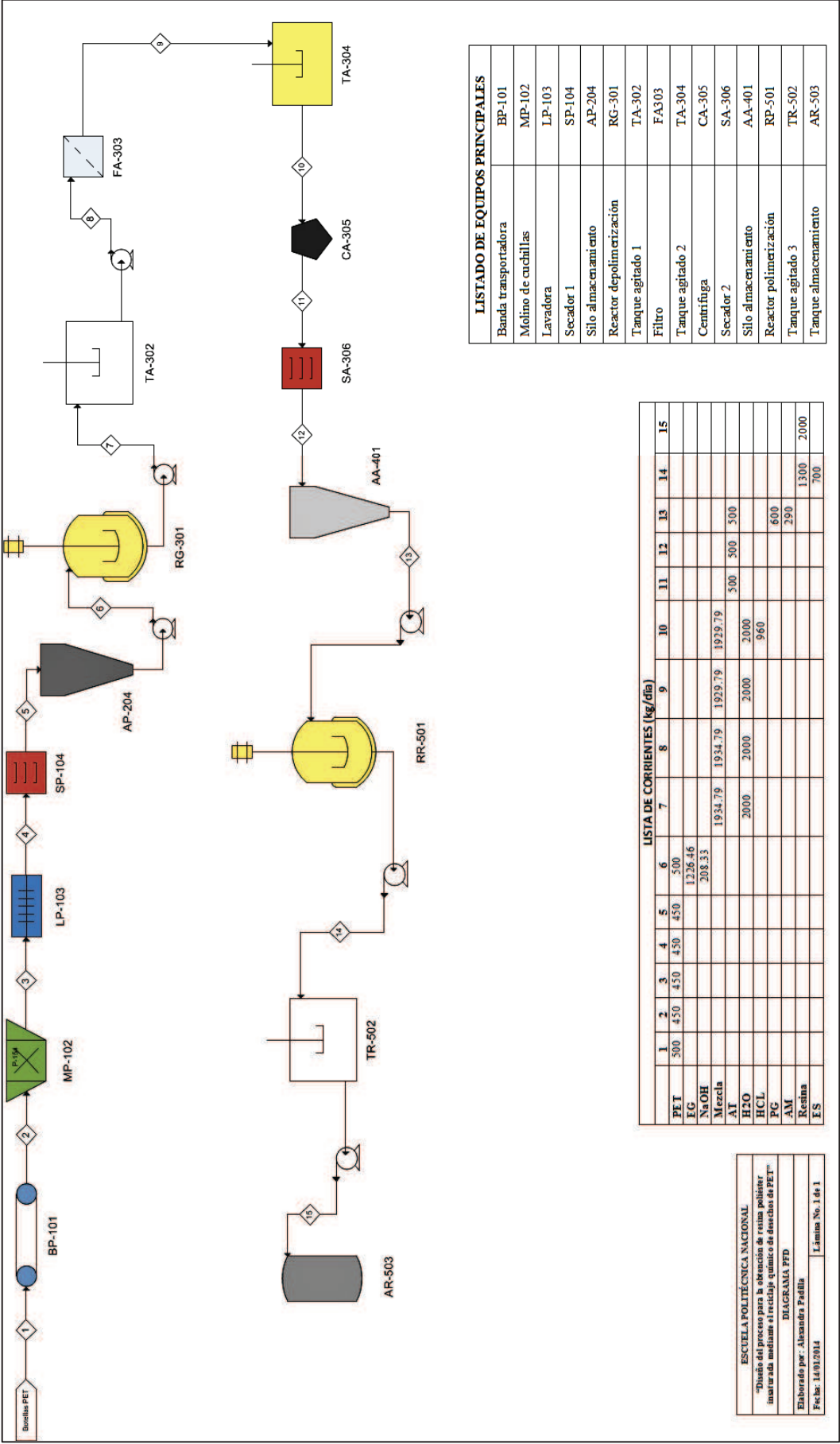


Figura 3.41. Diagrama de flujo (PFD) del proceso para la obtención de resina políster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilenteraftalato (PET).

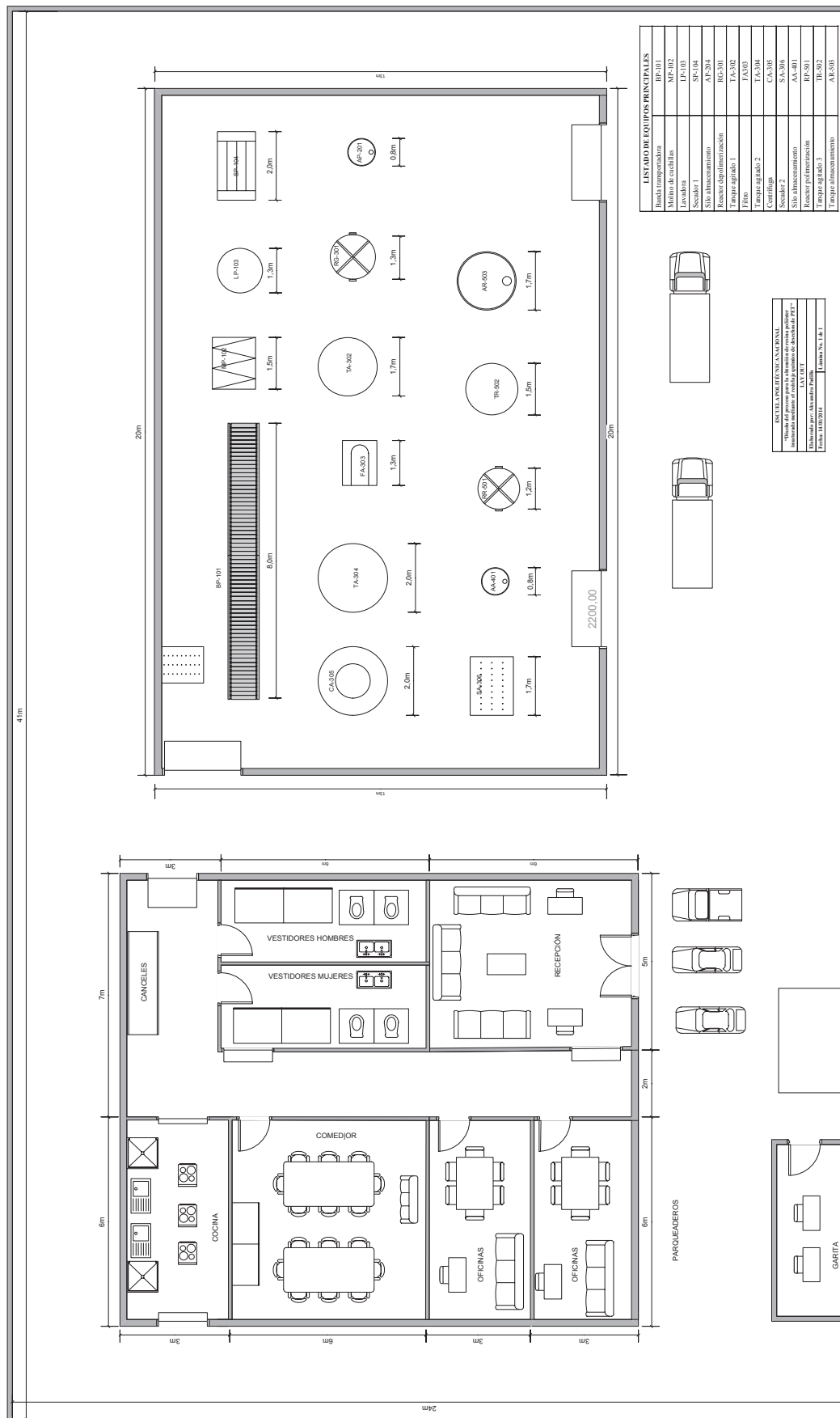


Figura 3.42. Plano de distribución de la planta piloto

3.5 ANÁLISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN DE RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS

3.5.1 COSTO DE LA MATERIA PRIMA

En la Tabla 3.32 se presenta el costo de la materia prima para la producción de 2000 kg de resina poliéster insaturada.

Tabla 3.32. Costo de la materia prima

Producto	Valor (\$)
Pacas PET	1 008,00
Etilenglicol	2 822,40
Hidróxido de sodio	244,61
Propilenglicol	1 774,08
Anhídrido maléico	909,44
Estireno	2 195,20
Total	8 953,73

En el ANEXO X se presentan las cotizaciones de la materia prima para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET).

3.5.2 COSTO DE EQUIPOS PRINCIPALES

En la Tabla 3.33 se presenta el costo de los equipos principales para la producción de resina poliéster insaturada.

En el ANEXO X se presentan las cotizaciones de los principales equipos para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET).

Tabla 3.33. Costo de los equipos principales

Equipo	Precio (\$)
Línea triturado-lavado-secado	32 000
Silo almacenamiento	5 992
Reactor de depolimerización	43 080
Reactor polimerización	40 800
Tanque agitado 1	6 300
Tanque agitado 2	9 553
Tanque agitado 3	6 000
Centrífuga	27 800
Secador	2 800
Tanque almacenamiento	3 248
Total	177 573

3.5.3 INVERSIÓN FIJA

En la Tabla 3.34 se muestran las inversiones fijas para la planta piloto diseñada. Los precios de los equipos se muestran en el ANEXO X.

Tabla 3.34. Inversiones fijas para la planta piloto diseñada

Detalle	Valor (\$)
Terreno + Construcciones	432 960
Precio equipos	177 573
TOTAL	610 533

3.5.4 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE PRODUCCIÓN

En la Tabla 3.35 se detalla los valores del costo del agua y energía eléctrico, así como recargos extras que se cobre para el caso de las industrias, con los cuales se determinó el costo por kilogramos de resina poliéster insaturada.

En la Tabla 3.36 se muestran los costos por kilogramo de producción de la planta piloto; los resultados indican que el costo es de 4,56 \$/kg.

Los cálculos realizados para la determinación del costo por unidad de producción se encuentran en el ANEXO XI.

Tabla 3.35. Costo del agua, energía eléctrica y recargos extras

Descripción	Valor (\$)
Salario mínimo con beneficios de ley	406,46 \$/mes
Costo de m ³ agua	0,72 \$/m ³
Alcantarillado	36,6 % consumo agua
Comercialización agua	2,10 \$/mes
Costo kWh	0,068 \$/kWh
Recargo industrial	4,182 \$/kW.mes
Alumbrado público	5 % consumo energía
Comercialización energía	1,141\$/mes
Recolección basura	10% consumo energía
Cuerpo de bomberos	17,52 \$/mes

Tabla 3.36. Costo del kilogramo de resina poliéster insaturada

Descripción	Valor (\$)
Materia prima	4,480
Mano de obra	0,050
Agua	0,004
Energía eléctrica	0,030
TOTAL	4,56

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Mediante las técnicas de espectroscopía de infrarrojo y calorimetría diferencial de barrido (DSC), se logró caracterizar a las botellas de PET que fueron utilizadas en el presente estudio y se determinó que se trataba de polietilentereftalato.
2. La depolimerización de las botellas de PET post consumo fue posible mediante una glicólisis alcalina con la cual se obtuvieron los monómeros: 87,7 % ácido tereftálico y 1,7 % de ácido isoftálico, 5,7 % de bis (hidroxi etilen tereftalato) y 4,9 % de etilenglicol. Es un método eficaz para reciclar el PET ya que se alcanzaron rendimientos mayores al 99 %.
3. La neutralización de las sales de los ácidos carboxílicos del producto obtenido de la glicólisis alcalina hasta alcanzar un pH=1 es un paso fundamental para la precipitación de ácido tereftálico, isoftálico y bis (hidroxi etilen tereftalato) y descartar oligómeros del PET de bajo peso molecular.
4. Se logró sintetizar resinas poliéster insaturada a partir del producto obtenido de la depolimerización de las botellas de PET y se elaboraron resinas de diferente composición con material reciclado, material puro y mezcla de material puro y reciclado; la mayoría de las resinas curaron y presentaron propiedades similares a una resina comercial.
5. La composición de la resina poliéster influyó en el tiempo de polimerización, así las resinas sintetizadas con material reciclado tardaron el triple (18 horas) para alcanzar un número ácido alrededor de 30 mg NaOH /g muestra en comparación con las resinas elaboradas con material puro. También influyó en el tiempo de curado de las misma, así resinas compuestas por

material puro curaron en 30 min mientras que las resinas con material reciclado curaron entre 60 a 80 min.

6. Las propiedades finales de la resina depende de la composición, las resinas obtenidas son rígidas pero frágiles, esto se debe al glicol empleado en este caso fue el propilenglicol.
7. La evaluación de las resinas obtenidas en comparación con una resina comercial fue satisfactoria. Las resinas obtenidas presentaron un contenido de sólidos promedio de 62 % y un valor de dureza promedio de 48, mientras que una resina comercial contiene entre 64 – 67 % de sólidos y un valor de dureza de 40, por tanto se encuentran dentro de un rango aceptable.
8. Las resinas no presenta buena estabilidad de almacenamiento a temperatura ambiente, en menos de un mes polimerizaron en los envases de vidrio donde se guardaron, a pesar que eran herméticos y se encontraban en un lugar seco y lejos de la energía solar.
9. El material seleccionado para los reactores de depolimerización y polimerización fue el acero inoxidable AISI 316 L, el volumen requerido en cada reactor no supera los 2 m³, como sistema de agitación se empleó un agitador tipo turbina de 4 palas y como fluido de calentamiento se utilizó aceite Dowtherm.
10. Se diseñó el proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET) para procesar 500 kg/día de botellas de PET, se incluyó los diagramas de bloques, flujo y lay out de la planta para un área 984 m², se requiere de 7245 KWh y de 151,5 m³ de agua mensuales para los procesos de lavado del PET y para la solubilización del producto depolimerizado. Sin embargo, los costos más elevados fueron los de la materia prima que suman \$ 179074,56 mensual.

11. Con el análisis del costo de producción de la resina poliéster insaturada se determinó el costo por kilogramo de resina que fue de \$ 4,56, valor mayor comparado con el precio de una resina comercial que es de \$ 3,94.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Reducir de tamaño las escamas de PET, si es posible pulverizarlas, con el fin de disminuir los tiempos de depolimerización.
2. Como investigación complementaria, se podría sintetizar resinas con dietilenglicol y trietilenglicol para comparar las propiedades mecánicas como esfuerzo a la tensión y flexión.
3. Para obtener una resina con menor flexibilidad, mayor dureza y rigidez emplear junto con los glicoles, estructuras cíclicas y aromáticas como el ciclohexanodi-metanol y alcoholes modificados del bisfenol. Si se desea obtener una resina más flexibles se recomienda emplear ácido adípico o ácido sebácico.
4. Complementar esta investigación con la síntesis de resinas poliéster con mayor cantidad de anhídrido maléico que permita aumentar la instauración por tanto la reactividad y favorecer el proceso de reticulación.
5. Controlar la temperatura de la reacción, cantidad de agua formada y número ácido para evitar la gelación de la resina
6. Estudiar con mayor profundidad la adición de inhibidores como la hidroquinona o catecol, con el fin de aumentar la vida útil del poliéster insaturado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abu, D., Ahmad, I. y Ramli, A. (2006). Chemical Recycling of PET Waste from Soft Drink Bottles to Produce a Thermosetting Polyester Resin. *Malaysian Journal of Chemistry*, 8(1), 22-26. Recuperado de http://www.ikm.org.my/images/stories/mjc8_022_026_dratnasari.pdf (Septiembre 2012).
2. Achilias, D. y Karayannidis, G. (2004). The Chemical Recycling of PET in the Framework of Sustainable development. *Water, Air and Soil Pollution*, 4(4-5), 385-390. doi: 10.1023/B:WAFO.0000044812.47185.0f.
3. AIMPLAS. (2008). *Situación actual y perspectivas del uso del PET reciclado para envases en contacto con alimentos*. Recuperado de http://www.ecoembes.com/es/documentos-e-informacion/estudios-idi/Documents/PI%C3%A1sticos/INFORME_FASE1.pdf.
4. Ahamad, A., Lubi, M., Mohan, A., Safeer, M. y Thachil, E. (2011). Synthesis of unsaturated polyester resin-effect of anhydride composition. *Designed Monomers and Polymers*, 4(3), 260-267. doi: 10.1163/156855501750536242.
5. Araiza, M., Bringas, G., Castaño, M. y Flores, J. (2000). Catalytic Depolymerization of Poly Ethylene Terephtalate. *Journal of Polymer Materials*, 46(1-2), 217-226. doi: 10.1080/00914030008054855.
6. Automatismo Industrial. (2006). *Información Técnica del PET*. Recuperado de http://st-1.com.ar/info/Informacion_de_PET.pdf (Septiembre 2013).
7. Banco Central Del Ecuador. (2012). *Consulta de totales por nandina*.

Recuperado de <http://www.bce.fin.ec/frame.php?CNT=ARB0000766> (Septiembre 2012).

8. Baro, M., Bordas, S., Clavaguera, M., Clavaguera, N. y Suriñach, S. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la ciencia de los materiales. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 31(1), 11-17. Recuperado de http://ddd.uab.cat/pub/artpub/1992/9923/b_oIsocespcervid_a1992v31n1p11.pdf.
9. Bartolome, L. Irman, M.y Cho, B. (2012). Recent developments in the chemical recycling of PET. *Material Recycling – Trends and Perspectives*, 65-84. Recuperado de <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/32561.pdf> (Abril 2013)
10. Berzina, R., Kalnins, M., Rence, L. y Viksne, A. (2002). Unsaturated Polyester Resins Based on PET Waste Products Form Glycolysis by Ethylene, Propylene and Diethylene Glycols and their Mixtures. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 27(1 C), 33-42. Recuperado de http://ajse.kfupm.edu.sa/articles/271C_04p.pdf (Junio 2013).
11. Binsack, R. (1996). Thermoplastic Polyesters. En Bottenbruch, L. *Engineering Thermoplastics: Polycarbonates, Polyacetals, Polyesters, Cellulose Esters* (pp. 6-111). Munich, Alemania: Hanser.
12. Boeing, H. (1969). *Polyesters, Unsaturated. Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. 11. 129-168.
13. Bottenbruch, L. (1996). Introduction. En Bottenbruch, L. *Engineering Thermoplastics: Polycarbonates, Polyacetals, Polyesters and Cellulose Esters* (pp. 1-5). Munich, Alemania: Hanser

14. Brydson, J. (1999). *Plastic Materials* (7ma. ed.). Londres: Butterworth Heinemann.
15. Calhoun, A. y Peacock, A. (2006). *Polymer Chemistry*. Munich, Alemania: Hanser.
16. Cano, L., Pérez, Y. y Espinel, J. (2002). *Producción de resinas alquídicas a partir de los desechos del proceso del poliéster*, 1-9. Recuperado de <http://www2.unalmed.edu.co/dyna2005/136/produccionderesinas.pdf> (Septiembre 2012).
17. Chaeichian, S., Pourmahdian, S. y Taromi, F. (2008). Synthesis of Unsaturated Polyester Resins from PET Waste: Effect of a Novel Co-catalytic System on Glycolysis and Polyesterification Reactions. *Designed Monomers and Polymers*, 11(2),187-199. doi:10.1163 /1568555 08X298080.
18. Chemsystems. (2009). *Polyethylene Terephthalate*. Recuperado de http://www.hemsystems.com/reports/search/docs/abstracts/0708_5_abs.pdf (Octubre 2013).
19. Chen, C., Chen, C., Liao, W., Lo, Y. y Mao, C. (2001). Studies of glycolysis of poly(ethylene terephthalate) recycled from postconsumer soft-drink bottles. I. Influences of glycolysis conditions. *Journal of Applied Polymer Science* , 80 (7), 943-948. doi:10.1002/app.1174.
20. Cherian, B. y Thachil, E. (2004). Synthesis of unsaturated polyester resin- Effect of choice of reactants and their relative proportions. *International Journal of Polymeric Materials*, 53(10), 829-845. doi: 10.1080/00914030490502364.
21. Coker, K. (2001). *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Desing*. Houston: Butterworth Heinemann.

22. Culler, J., Hernandez, R. y Selke, S. (2000). *Plastics Packaging*. Munich: Hanser Publishers.
23. Czub, P., Penczek, P. y Pielichowski, J. (2005). Unsaturated Polyester Resins: Chemistry and Technology. *Avances in Polymer Science*, 184, 1-95. doi: 10.1007/b136243.
24. Dumitru, P. y Firas, A. (2005). Recycling of PET. *Elsevier European Polymer Journal*, 41(7), 1453-1477. doi: 10.106/j.eurolymj.2005020005.
25. Ehrenstein, G., Riedel, G. y Trawiel, P. (2004). *Thermal Analysis of Plastics*. Munich, Alemania: Hanser.
26. Elgegren, M. y Nakamatsu, J. (2009). *Poliésteres insaturados a partir de desechos de PET*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Licenciada en Química), Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/ELGEGREN_ITUMA_MARIELA_POLIESTER_INSATURADOS_RECICLAJE (Mayo 2013).
27. Estrada, A. y Herrera, J. (2012). Depolimerización de botellas de poli(tereftalato de etileno) (PET) post consumo mediante glicólisis. Efecto del catalizador y del tipo de glicol. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(3), 117-129. Recuperado de <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/JUL12/herrera.pdf> (Mayo 2013).
28. Fairgrieve, S. (2009). *Degradation and Stabilisation of Aromatic Polyesters*. Recuperado de http://www.bib.convdocs.org/docs/18/17752/conv_1/file1.pdf (Noviembre 2013).
29. Fink, J. y Leoben, M. (2013). *Unsaturated Polyester Resins*. (2da. ed.), Austria: William Andrew.

30. Fontan, J. y Guzman, J. (2000). Poliésteres Insaturados. *En ICYT, Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos*. Selección de artículos publicados en Revista de Plásticos Modernos (pp. 99-107). Madrid, España: PGM.
31. Fusheng, L., Xiao, C., Shitao, Y. y Xiaoping, G. (2009). *Study on methanolysis of waste poly(ethylene terephthalate) in ionic liquid*, 272-276. Recuperado de http://www.fsrj.org/act/7_nenkai/12-5-IFSR/Proceeding-IFSR05/R-52.pdf (Marzo 2013).
32. Gharal, P., Kelkar, A., Labde, J., Nayak, S., Roa, K. y Venkatachalam, S. (2012). Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate). En H. Saleh, *Polyester* (pp. 75-98). doi:10.5772/48612.
33. Geil, P. (2002). Crystal Structure, Morphology and Orientation of Polyesters. En Fakirov, S. *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites* (pp. 105-224). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
34. Google. (2013). *Google Maps*. Recuperado de <http://maps.google.es/> (Octubre 2013). Recuperado el Octubre de 2013, de <http://maps.google.es/>
35. Harriott, P., McCabe, W. y Smith, J. (1998). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. España: McGraw-Hill.
36. Hernandez, P. y Orjuela, M. (2004). *Estudio de las rutas de síntesis de poliuretanos a través del tratamiento químico de polietilentereftalato, (PET) post consumo*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Licenciada en Química). Recuperado de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6605/2/11242>

0.pdf (Junio 2013).

37. Jankauskaite, V., Macijauskas, G. y Lygaitis, R. (2008). Polyethylene Terephthalate Waste Recycling and Application Possibilities: a Review. *Materials Science*, 14(2), 119-127. Recuperado de [http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/medz/medz0-93/06%20Polymers \(pp.119-127\).pdf](http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/medz/medz0-93/06%20Polymers(pp.119-127).pdf) (Febrero 2013).
38. Jeong, D., Kim, J., Kim, L., Lee, Y., Moon, I. y Son, C. (2007). Synthesis and applications of unsaturated polyester resins based on PET waste. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 24(6), 1076-1083. doi: 10.1007/s11814-007-0124-5.
39. Lambert, J. y Mazzola, E. (2004). *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. New Jersey: Pearson.
40. León, J. (2001). *Diseño y cálculos de recipientes a presión*. México: Recuperado de <http://www.scribd.com/doc/17247549/diseno-y-calculo-de-recipientes-a-presion> (Octubre 2013).
41. Lepoittevin, B. y Roger, P. (2011). Poly(ethylene terephthalate). En Thomas, S. y Visakh, P. *Handbook of engineering and specialty thermoplastics*. [Versión Adobe]. doi: 10.1002/9781118104729.ch4.
42. Maldonado, T., Rosales, A. y Sánchez, M. (2011). *Estudio de catalizadores en la degradación del PET reciclado*. Recuperado de dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3401979.pdf (Julio 2013).
43. Malik, M., Choudhary, V. y Varma, K. (2000). Current Status of Unsaturated Polyester Resins. *Journal of Macromolecular Science*, 139-165. doi: 10.1081/MC-100100582.
44. Marechal, E. (2002). Polyesters: Synthesis and Chemical Aspects. En

- Fakirov, S. *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites* (pp. 3-58). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
45. Megyesy, E. (1989). *Manual de recipientes a presión: diseño y cálculo*. México: Limusa.
 46. Mishra, S. y Goje, A. (2007). Chemical Recycling, Kinetics, and Thermodynamics of Alkaline Depolymerization of Waste Poly(Ethylene Terephthalate) (PET). *Polymer Reaction Engineering*, 11(4), 963-987. doi: 10.1081/PRE-120026382.
 47. Mishra, S., Goje, A. y Zope, V. (2007). Chemical Recycling, Kinetics, and Thermodynamics of Hydrolysis of Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Waste in Sulfuric Acid in Presence of Phosphoric Acid. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 42(4), 581-603. doi: 10.1081/PPT-120023097.
 48. Mano, J. (2003). Propiedades térmicas de los polímeros en la enseñanza de la ciencia de materiales e ingeniería – Estudiad DSC sobre Poli (tereftalato de etileno). *Journal of Materials Education*, 25 (4-6). Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/266/26625607.pdf>. (Septiembre 2013).
 49. Müller, M. (1996). Unsaturated Polyester Resins. En Freitag, W. y Stoye, D. *Resins for Coatings* (pp. 81-100). Munich: Hanser Publishers.
 50. Nadkarni, V. (2002). Recycling of Polyesters. En Fakirov, S. *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites* (pp. 1223-1249). Weinheim: Wiley-VCH.
 51. Nava, H. (2004). *Polyesters, Unsaturated*. [Versión Adobe]. Doi: 10.1002/0471238961.161512251905121.

52. Öztürk, Y. y Güçlü, G. (2007). Unsaturated polyester resins obtained from glycolysis products of waste PET. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 1539-1552. doi: 10.1081/PPT-200030272.

53. Plastic Europe. (2012). *The Facts 2012*. Recuperado de <http://www.plasticseurope.es/Document/plasticos---situacion-en-2012.aspx?Page=DOCUMENT&FolID=2> (Marzo 2013).

54. Plastics Europe Market Research Group. (2012). *Thermoplastics Resin - A Global Market Watch, 2011*. Recuperado de http://www.reseau-plasturgie.ch/fileadmin/user_upload/pdf/conference/jt2012/exposes/09.20_Schorr_Kunststofftagung%20Presentation_EN.pdf (Marzo 2013).

55. Rashid, M., y Sarker, M. (2013). Thermal Degradation of Poly (ethylene terephthalate) Waste Soft Drinks Bottles and Low Density Polyethylene Grocery Bags. *International Journal of Sustainable Energy and Environment* , 1 (3), 78-86. Recuperado de [http://www.ijsee.com/IJSEE_VOL.%201,%20NO.%203,%20April%202013/Thermal%20degradation%20of%20poly%20%20\(ethylene%20terephthalate\)%20waste%20soft%20drinks%20bottles%20and%20Low%20Density%20%20Polyethylene%20Grocery%20Bags.pdf](http://www.ijsee.com/IJSEE_VOL.%201,%20NO.%203,%20April%202013/Thermal%20degradation%20of%20poly%20%20(ethylene%20terephthalate)%20waste%20soft%20drinks%20bottles%20and%20Low%20Density%20%20Polyethylene%20Grocery%20Bags.pdf).

56. Reinforce Plastic, (2012). *Tanques de fibra de vidrio*. Recuperado de http://www.viaoxean.com.ar/repasa/repasa/images/catalogo/2011_10_04_12_59_16CatA_logo_Tanques_PRFBV.pdf

57. Smith, B. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (2da ed.). Boca Raton, Estados Unidos: Taylor & Francis.

58. Spaseska, D. y Civkaroska, M. (2010). Alkaline Hydrolysis of Poly(Ethylene Terephthalate) Recycled from the Postconsumer Soft-drink Bottles.

- Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 45(4), 379-384. Recuperado de http://www.uctm.edu/journal/j2010-4/2_Spaseska_379-384.pdf (Febrero 2013).
59. Spychaj, T. (2002). Chemical Recycling or PET: Methods and Products. En Fakirov, S. *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites* (pp. 1251-1290). Weinheim: Wiley-VCH
 60. Stermitz, F. y Weininger, S. (1988). *Química Orgánica*. Barcelona: Reverté.
 61. Stuart, B. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and applications*. Recuperado de <http://www.pharmaresearchlibrary.com/wp-content/uploads/2013/04/Infrared-Spectroscopy-Fundamentals-and-Applications-Barbara-Stuart.pdf>.
 62. Vitkauskienė, I. y Makuška, R. (2008). Glycolysis of industrial poly(ethylene terephthalate) waste directed to bis(hydroxyethylene) terephthalate and aromatic polyester polyols. *Chemija*, 19(2), 29-34. Recuperado de <http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7216/2008/2/29-34.pdf> (Marzo 2013).
 63. Weatherhead, R. (1980). *FRP Technology: Fibre Reinforced Resin Systems*. [Versión Adobe]. Doi: 10.1007/978-94-009-8721-0_9.
 64. Weisstaler. (2013). *Torispherical head*. Recuperado de <http://www.weisstaler.de/web/2/products/heads/kloepperboden.html>. (Octubre 2013).

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE LA GLICÓLISIS DEL PET (PRUEBAS PRELIMINARES)

En la Tabla AI.1 se presenta los datos experimentales de la prueba preliminar 1 de glicólisis, relación g PET / ml EG = 0,3

Tabla AI.1. Prueba preliminar 1 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	201,00	143,57	Papel filtro (P1)	0,7228
EG	747,72	670,00	Papel filtro+PET (P2)	1,0352
NaOH	104,69	49,85	PET no rx	0,3124
TOTAL	1053,41	863,42	% rendimiento	99,8446

En la Tabla AI.2 se presenta los datos experimentales de la prueba preliminar 2 de glicólisis, relación g PET / ml EG = 0,4

Tabla AI.2. Prueba preliminar 2 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	200,50	4,02	Papel filtro (P1)	0,7358
EG	559,40	501,25	Papel filtro+PET (P2)	1,5987
NaOH	104,43	49,73	PET no rx	0,8629
TOTAL	864,32	555,00	% rendimiento	99,5696

En la Tabla AI.3 se presenta los datos experimentales de la prueba preliminar 3 de glicólisis, relación g PET / ml EG = 0,5

Tabla AI.3. Prueba preliminar 3 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	200,80	4,04	Papel filtro (P1)	0,7169
EG	448,19	401,60	Papel filtro+PET (P2)	1,6894
NaOH	104,58	49,80	PET no rx	0,9725
TOTAL	753,57	455,44	% rendimiento	99,5157

En la Tabla AI.4 se presenta los datos experimentales de la prueba preliminar 4 de glicólisis, relación g PET / ml EG = 0,6

Tabla AI.4. Prueba preliminar 4 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	201,20	4,04	Papel filtro (P1)	0,7423
EG	374,23	335,33	Papel filtro+PET (P2)	1,6284
NaOH	104,79	49,90	PET no rx	0,8861
TOTAL	680,22	389,27	% rendimiento	99,5596

- **Cálculo del rendimiento**

El ejemplo de cálculo para el rendimiento de la prueba preliminar 1.

$$\text{g PET no rx} = P2 - P1 \quad [\text{AI.1}]$$

$$\text{g PET no rx} = 1,2086 - 0,7228 = 0,3124$$

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{(\text{g PET inicial} - \text{g PET no rx})}{\text{g PET inicial}} \times 100 \quad [\text{AI.2}]$$

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{(201,00 - 0,3124)}{201,00} \times 100 = 99,84$$

ANEXO II

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE LA GLICÓLISIS DEL PET (PRUEBAS DEFINITIVAS)

A continuación se detallan la composición empleada en cada una de las pruebas de glicólisis realizadas para obtener la materia prima con la que se sintetizó las resinas poliéster insaturadas.

En la Tabla AII.1 se presenta los datos experimentales de la prueba 1 de glicólisis.

Tabla AII.1. Prueba 1 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	204,10	145,79	Papel filtro (P1)	0,7189
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,3256
NaOH	88,00	41,90	PET no rx	0,6067
TOTAL	850,10	687,69	% rendimiento	99,7027

En la Tabla AII.2, se presenta los datos experimentales de la prueba 2 de glicólisis.

Tabla AII.2. Prueba 2 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	201,00	143,57	Papel filtro (P1)	0,7054
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,6840
NaOH	87,63	41,73	PET no rx	0,9786
TOTAL	846,63	685,30	% rendimiento	99,5131

En la Tabla AII.3 se presenta los datos experimentales de la prueba 3 de glicólisis.

Tabla AII.3. Prueba 3 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	200,80	143,43	Papel filtro (P1)	0,7485
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,0845
NaOH	87,70	41,76	PET no rx	0,3360
TOTAL	846,50	685,19	% rendimiento	99,8326

En la Tabla AII.4, se presenta los datos experimentales de la prueba 4 de glicólisis.

Tabla AII.4. Prueba 4 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	202,30	144,50	Papel filtro (P1)	0,7325
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,0352
NaOH	87,58	41,70	PET no rx	1,3256
TOTAL	847,88	686,20	% rendimiento	99,3447

En la Tabla AII.5, se presenta los datos experimentales de la prueba 5 de glicólisis.

Tabla AII.5. Prueba 5 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	200,98	143,56	Papel filtro (P1)	0,7264
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,4580
NaOH	87,58	41,70	PET no rx	0,7316
TOTAL	846,56	685,26	% rendimiento	99,6359

En Tabla AII.6, se presenta los datos experimentales de la prueba 6 de glicólisis.

Tabla AII.6. Prueba 6 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	200,32	143,09	Papel filtro (P1)	0,7193
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	0,9845
NaOH	87,60	41,71	PET no rx	0,2652
TOTAL	845,92	684,80	% rendimiento	99,8676

En la Tabla AII.7, se presenta los datos experimentales de la prueba 7 de glicólisis.

Tabla AII.7. Prueba 7 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	202,30	144,50	Papel filtro (P1)	0,7221
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,0352
NaOH	87,81	41,81	PET no rx	1,0990
TOTAL	848,11	686,31	% rendimiento	99,4567

En la Tabla AII.8, se presenta los datos experimentales de la prueba 8 de glicólisis.

Tabla AII.8. Prueba 8 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	203,41	145,29	Papel filtro (P1)	0,7089
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,2120
NaOH	87,69	41,76	PET no rx	0,5031
TOTAL	849,10	687,05	% rendimiento	99,7526

En la Tabla AII.9, se presenta los datos experimentales de la prueba 9 de glicólisis.

Tabla AII.9. Prueba 9 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	201,88	144,20	Papel filtro (P1)	0,9980
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,2380
NaOH	87,73	41,78	PET no rx	0,2400
TOTAL	847,61	685,98	% rendimiento	99,8811

En la Tabla AII.10, se presenta los datos experimentales de la prueba 10 de glicólisis.

Tabla AII.10. Prueba 10 de glicólisis alcalina del PET

Compuesto	Peso (g)	Volumen (ml)	Detalle	Peso (g)
PET	200,70	143,36	Papel filtro (P1)	0,7185
EG	558,00	500,00	Papel filtro+PET (P2)	1,4896
NaOH	87,73	41,78	PET no rx	0,7711
TOTAL	846,43	685,13	% rendimiento	99,6157

- **Cálculo del rendimiento**
-

El ejemplo de cálculo para el rendimiento de la reacción de glicólisis alcalina del PET corresponde a la prueba 1.

$$\text{g PET no rx} = \text{P2-P1} \quad [\text{AII.1}]$$

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{(\text{g PET inicial} - \text{g PET no rx})}{\text{g PET inicial}} \times 100 \quad [\text{AII.2}]$$

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{(204,10 - 0,6067)}{204,10} \times 100 = 99,70$$

ANEXO III

RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS SINTETIZADAS

A continuación se detallan la composición empleada en cada síntesis de las resinas poliéster insaturadas.

En la Tabla AIII.1, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 1.

Tabla AIII.1. Composición de la resina poliéster insaturada 1

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Ácido tereftálico	1,05	175,00	114,98
Anhídrido maléico	1,08	105,58	71,34
Propilenglicol	4,21	320,00	308,88
Total	6,34	600,58	495,20

* Ácido tereftálico producto de la glicólisis

En la Tabla AIII.2, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 3.

Tabla AIII.2. Composición de la resina poliéster insaturada 3

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Ácido tereftálico	0,61	100,78	66,22
Anhídrido ftálico	0,68	100,50	65,69
Anhídrido maléico	1,23	120,30	81,28
Propilenglicol	5,00	380,00	366,80
Total	7,51	701,58	579,98

* Ácido tereftálico producto de la glicólisis

En la Tabla AIII.3, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 4.

Tabla AIII.3. Composición de la resina poliéster insaturada 4

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Anhídrido ftálico	1,35	200,23	131,56
Anhídrido maléico	1,23	120,21	78,57
Propilenglicol	5,00	380,00	366,80
Total	7,58	700,44	576,92

En la Tabla AIII.4, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 5.

Tabla AIII.4. Composición de la resina poliéster insaturada 5

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Anhídrido ftálico	1,35	200,23	131,56
Anhídrido maléico	1,23	120,21	78,57
Propilenglicol	5,00	380,00	366,80
Total	7,58	700,44	576,92

En la Tabla AIII.5, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 6.

Tabla AIII.5. Composición de la resina poliéster insaturada 6

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Ácido tereftálico	1,31	216,90	142,51
Anhídrido maléico	1,32	129,52	87,51
Propilenglicol	4,01	305,00	294,40
Total	6,64	651,42	524,42

* Ácido tereftálico producto de la glicólisis

En la Tabla AIII.6, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 7.

Tabla AIII.6. Composición de la resina poliéster insaturada 7

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Ácido tereftálico	0,65	108,00	70,96
Anhídrido ftálico	0,73	108,10	70,65
Anhídrido maléico	1,32	129,36	87,41
Propilenglicol	4,01	305,00	294,40
Total	6,71	650,46	523,42

* Ácido tereftálico producto de la glicólisis

En la Tabla AIII.7, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 9.

Tabla AIII.7. Composición de la resina poliéster insaturada 9

Compuesto	n (moles)	Peso (g)	Volumen (ml)
Ácido tereftálico	1,31	216,90	142,51
Anhídrido maléico	1,32	129,52	87,51
Propilenglicol	4,01	305,00	294,40
Total	6,64	651,42	524,42

* Ácido tereftálico producto de la glicólisis

ANEXO IV

DETERMINACIÓN NÚMERO ÁCIDO

A continuación se presentan los datos experimentales obtenidos durante la síntesis de las resinas poliéster insaturadas.

En la Tabla AIV.1, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 1.

Tabla AIV.1. Datos experimentales de la resina 1

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso M (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0,00	56,3981	57,2358	0,8377	21,7000	142,7972
1,50	56,3914	57,2188	0,8274	19,8000	131,9162
3,50	56,3916	57,2860	0,8944	21,5000	132,5120
8,00	56,3863	57,3809	0,9946	21,5000	119,1622
12,00	56,3895	57,3425	0,9530	20,2000	116,8441
16,00	56,3867	57,4615	1,0748	20,0000	102,5772
18,00	56,3821	57,0885	0,7064	15,0000	117,0547
20,50	56,3795	56,9859	0,6064	8,5000	77,2695
23,50	56,3681	56,8246	0,4565	2,0000	24,1511

En la Tabla AIV.2, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 3.

Tabla AIV.2. Datos experimentales de la resina 3

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0,00	56,4012	57,6871	1,2859	32,0000	137,1801
2,50	56,3721	57,4241	1,0520	25,0000	131,0004
5,00	56,3714	57,4508	1,0794	20,0000	102,1400
8,50	56,3648	56,7836	0,4188	4,5000	59,2317
10,50	61,3143	61,7540	0,4397	3,0000	37,6109
14,00	56,3723	57,1913	0,8190	4,0000	26,9231

En la Tabla AIV.3, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 4.

Tabla AIV.3. Datos experimentales de la resina 4

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso M (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0,00	61,3289	62,5890	1,2601	19,5000	85,3057
2,50	61,3165	62,0679	0,7514	10,5000	77,0312
4,00	61,3095	62,5801	1,2706	15,5000	67,2467
5,00	61,3103	62,3185	1,0082	10,5000	57,4105
6,00	61,3086	61,7351	0,4265	3,4000	43,9449

En la Tabla AIV.4, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 5.

Tabla AIV.4. Datos experimentales de la resina 5

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso M (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0,00	61,3518	62,6847	1,3329	28,0000	115,8001
2,00	63,1099	64,5014	1,3915	28,0000	110,9234
4,00	63,1099	64,5014	1,3915	27,3000	108,1503
5,00	61,3130	62,5912	1,2782	7,7000	33,2078
6,00	56,3704	57,2966	0,9262	2,2000	13,0938

En la Tabla AIV.5, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 6.

Tabla AIV.5. Datos experimentales de la resina 6

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso M (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0,00	56,3987	57,3589	0,9602	19,0000	112,0666
1,00	63,1299	64,0874	0,9575	18,0000	106,4677
2,00	61,1458	62,1871	1,0413	18,5000	100,6190
3,00	61,1321	62,0982	0,9661	17,0000	99,6578
13,00	56,3892	57,1478	0,7586	8,0000	59,7257
14,00	63,1187	64,1001	0,9814	6,0000	34,6250
15,00	61,0894	62,0812	0,9918	5,5000	31,4067
16,50	56,3928	57,2849	0,8921	4,5000	28,5682
18,50	56,3919	57,0283	0,6364	0,9000	8,0093

En la Tabla AIV.6, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 7.

Tabla AIV.6. Datos experimentales de la resina 7

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso M (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0	61,3343	62,1580	0,8237	12,0000	82,5081
1	56,4723	57,4247	0,9524	13,5000	80,2784
14	56,3715	57,4510	1,0795	11,0000	57,7104
16,5	61,3333	62,3356	1,0023	12,2000	68,9360
17,5	61,3334	61,9501	0,6167	4,8000	44,0810
18,5	61,3286	62,0713	0,7427	0,9000	6,8630

En la Tabla AIV.7, se presenta los datos experimentales de la resina poliéster 9.

Tabla AIV.7. Datos experimentales de la resina 9

Tiempo (horas)	Peso E (g)	Peso E+M (g)	Peso M (g)	V (NaOH) (ml)	# ácido mg NaOH/g m
0	56,3912	57,4171	1,0259	22,0000	121,4512
1	60,8471	61,7845	0,9374	20,0000	120,8340
2	63,1190	64,0414	0,9224	19,5000	119,7291
3	63,0879	64,0831	0,9952	20,1000	114,3852
13	59,2605	61,0288	1,7683	17,0000	54,4474
14	56,4792	57,5278	1,0486	8,5000	45,9085
15	56,7230	57,9851	1,2621	7,5000	33,6552
16,5	56,3928	57,2849	0,8921	4,5000	28,5682
18	56,3733	57,1918	0,8185	3,0000	20,7581
20	60,9813	61,4738	0,4925	1,0000	11,4995

- **Cálculo del número ácido**

El ejemplo de cálculo para el rendimiento de la reacción de glicólisis alcalina del PET corresponde a la resina 1 a un tiempo de 1,5 h.

Peso E= peso erlenmeyer

Peso E+M= peso muestra

Peso M= peso muestra

$$\text{Peso M} = (\text{Peso E+M}) - (\text{Peso E})$$

[AIV.1]

$$\text{Peso M} = (57,2188) - (56,3914)$$

$$\text{Peso M} = 0,8274$$

$$\text{Índice de acidez} = \frac{5,61 \times V(\text{ml, NaOH } 0,1\text{N})}{\text{peso muestra(g)}}$$

[AIV.2]

$$\text{Índice de acidez} = \frac{5,61 \times 19,80}{0,8274}$$

$$\text{Índice de acidez} = 131,92$$

ANEXO V

FICHA TÉCNICA DE UNA RESINA POLIÉSTER INSATURADA COMERCIAL

REICHOLD		[BOLETIM TÉCNICO]
Julho / 2004		
COMPOSITES Polylite 33915-15		
DESCRIPCIÓN		
Resina poliéster insaturada, ortoftálica, totalmente polimerizable, baja reactividad, media viscosidad, no acelerada.		
APLICACIONES		
Base para gelcoats, prensage a frío, utilizando tejido, manta o preforms de fibras de vidrio. Reservorios o equipamientos en general.		
CARACTERÍSTICAS		
<ul style="list-style-type: none"> Rápido ciclo de cura. Excelente compatibilidad con pigmentos. Elevadas propiedades mecánicas. 		
PROPIEDADES		
CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN
Viscosidad Brookfield a 25°C (cp)	PP 01 - 124	400 - 600
Sólidos a 105°C (%)	PP 01 - 035	64 - 67
Índice de Acidez (mgKOH/g)	PP 01 - 003	22 - 33
Curva Exotérmica - Gel Time (minutos) - Temperatura Máxima (°C) - Tempo mínimo de cura (minutos)	PP 01 - 296	10 - 12 A determinar A determinar
<p>* 100,0 g de Resina 0,20 % de Naftenato u Octoato de Cobalto a 6 % de Metal 1,5 % de Peróxido de Metil Etil Cetona</p> <p>Pos-cura es necesaria para obtención de la polimerización completa en contato con productos alimenticios.</p> <p><small>Las informaciones aqui dadas son de caracter geral, con el proposito de auxiliar nuestros clientes a determinar si nuestros productos son adecuados a sus aplicaciones. Nuestros productos son recomendados para clientes industriales. Recomendamos a nuestros clientes que inspeccionen y evalúen técnicamente el desempeño de nuestros productos en sus propias condiciones, para aprobación previa a sua comercialização. Nosotros garantimos que nuestros productos atenderen a las especificaciones técnicas aqui descritas. Nada aqui contenido deberá constituir outra qualquer garantia expresa o implícita, incluyendo garantia de comerciabilidade o adequación a un propósito específico y ninguna protección de leyes o patentes podrá ser inferido. Todos los derechos a patentes son reservados. La exclusiva remediación para todas las reivindicaciones fundamentadas se limitarán a la reposición de nuestros materiales y en ningún evento seremos responsables por daños especiales, incidentales o consecuentes.</small></p> <p style="text-align: center;"><small>REICHOLD DO BRASIL, "55 11 4795-6201" Av Amazonas, 1100, 08744-340 Mogi das Cruzes, SP Brasil</small></p>		

Figura AV.1. Ficha técnica de una resina poliéster insaturada

REICHHOLD
[BOLETIM TÉCNICO]

La viscosidad de la resina puede ser reducida, añadiéndose monómero de estireno, pero, sin exceder 5%, para no alterar las propiedades finales de la resina polimerizada.

El gel time puede ser ajustado para adecuación al proceso, siguiendo las concentraciones mínimas y máximas de acelerador y catalizador, conforme tabla abajo:

	Mínimo	Máximo
% de Naftenato u Octoato de Cobalto a 8% de Metal	0,1	1,0
% Peróxido de Metil Etil Cetona	0,7	2,5

PROPIEDADES DE LA RESINA EN LA APLICACIÓN (*):

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISIS	VALORES TÍPICOS
Resistencia Máxima a Tracción (MPa)	PP 09 - 035	50
Módulo de Elasticidad em Tracción (MPa)	PP 09 - 035	3.400
Elongación Máxima	PP 09 - 035	2,0
Resistencia a Flexión (MPa)	PP 09 - 039	90
Módulo de Elasticidad en Flexión (MPa)	PP 09 - 039	4.500
Deformación Máxima (%)	PP 09 - 039	2,0
Dureza Barcol	PP 09 - 034	40
Contracción Linear (%)	PP 09 - 050	2,0
Temperatura de Termodistorción (°C)	PP 09 - 030	75

* Sin refuerzo de fibras de vidrio
Sistema de cura: Octoato de Cobalto / MEK-P
Pos Cura: 48 hs a 60°C

Las informaciones aqui citadas son de carácter general, con el propósito de auxiliar nuestros clientes a determinar si nuestros productos son adecuados a sus aplicaciones. Nuestros productos son recomendados para dentista industrial. Recomendamos a nuestros clientes que inspeccionen y evalúen técnicamente el desempeño de nuestros productos en sus propias condiciones, para aprobación previa a sus comercializaciones. Nosotros garantizamos que nuestros productos atenderán a las especificaciones técnicas aqui descritas. Nada aqui contenido deberá constituir otra cualquiera garantía expresa o implícita, incluyendo garantía de comerciabilidad o adecuación a un propósito específico y ninguna protección de leyes o patentes podrá ser inferida. Todos los derechos a patentes son reservados. La exclusiva responsabilidad para todas las reivindicaciones fundamentadas se limitará a la reposición de nuestros materiales, y en ningún evento seremos responsables por daños especiales, incidentales o consecuentes.

REICHHOLD DO BRASIL "55 11 4795-8201" Av Amazonas, 1100, 08744-340 Mogi das Cruzes, SP Brasil

Figura AV.2. Ficha técnica de una resina poliéster insaturada (continuación)

ANEXO VI

DIMENSIONAMIENTO DE LOS REACTORES

El dimensionamiento de los reactores de depolimerización y polimerización se lo realizó con la aplicación del código ASME sección VIII división 1, se consideró un 20 % de sobredimensionamiento.

Ejemplo De Cálculo Para El Reactor De Depolimerización

En la tabla VI.1 se presenta los parámetros utilizados para el dimensionamiento del reactor.

Tabla AVI.1. Parámetros del proceso de depolimerización

Volumen	2 m ³
Temperatura	187,5 °C
Densidad	1220 kg/m ³

Para reactores la relación altura/diámetro es de 1 a 1,4. Se escogió una relación de:

$$\frac{H}{D}=1,2$$

El diámetro del tanque se calculó con el volumen de la masa reaccionante y con la ecuación AVI.1:

$$V_{rx}=\pi\frac{D^2}{4}H \quad [AVI.1]$$

Reemplazando D en la ecuación AVI.1

$$V_{rx}=1,2\pi\frac{D^3}{4}$$

$$D=\sqrt[3]{\frac{4V_{rx}}{1,2\pi}}$$

$$D=1,30 \text{ m}$$

$$H=1,554 \text{ m}$$

El dimensionamiento del reactor consta de tres partes: recipiente cilindro, fondo y tapa.

Dimensionamiento del recipiente cilindro

- *Cálculo del espesor considerando la presión interna*

La presión interna es igual a la presión relativa más la presión hidrostática.

La presión relativa se asume de 1 atm y se consideró un factor de seguridad del 20 %.

$$P_{\text{interna}} = P_{\text{relativa}} + P_{\text{hidrostática}}$$

La presión hidrostática se calculó con la ecuación AVI.2:

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho g H \quad [\text{AVI.2}]$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 1220 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1,55 \text{ m}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 18531,80 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 0,183 \text{ atm}$$

$$P_{\text{interna}} = P_{\text{relativa}} + P_{\text{hidrostática}}$$

$$P_{\text{interna}} = 1,08 \text{ atm}$$

El espesor en función de la presión interna se determinó con la ecuación AVII.3 que se muestra en la figura AVI.3.:

$$t_c = \frac{P_{\text{interna}} D}{2(SE - 0,6 \times P_{\text{interna}})} \quad [\text{AVI.3}]$$

Donde,

D=diámetro interno, m

S= esfuerzo permitido, atm

E=eficiencia de la soldadura

El valor de E es de 0,85. El esfuerzo permitido para el material en función de la temperatura se determinó de la figura AVI.1.

$$T = 368 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$S = 11152 \text{ psi} = 758,64 \text{ atm}$$

$$t_c = \frac{1,08 \text{ atm} \times 1,30 \text{ m}}{2(758,64 \text{ atm} \times 0,85 - 0,6 \times 1,08 \text{ atm})}$$

$$t_c = 0,001 \text{ m}$$

Se tomó en cuenta un espesor de corrosión $c = 2 \text{ mm}$

$$t = t_c + c = 3 \text{ mm}$$

- *Cálculo del espesor considerando la presión externa*

Se calculó el espesor en condiciones de la presión externa. La presión externa se multiplicará por un factor de seguridad.

$$P_{\text{externa}} = 0,86 \text{ atm}$$

Método gráfico:

Asumimos un espesor t y calculamos el diámetro externo del tanque D_o .

$$\text{Si } t=4 \text{ mm}$$

$$D_o=D+2t=1,303 \text{ m}$$

$$L=H$$

$$\frac{L}{D_o}=1,2 \quad [\text{AVI.4}]$$

$$\frac{D_o}{t}=325,7 \quad [\text{AVI.5}]$$

Con las relaciones anteriores se determinó el factor A con la ayuda de la figura AVI.5.

$$A=2 \times 10^{-4}$$

Hallado A, se encontró el factor B en la figura AVI. 6.

$$B=3000 \text{ psi}$$

El valor de la presión externa se calculó con la ecuación AVI.6:

$$P_{\text{externa}} = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t} \right)} \quad [\text{AVI.6}]$$

$$P_{\text{externa}}=0,84 \text{ atm}$$

$$t=4+c=6 \text{ mm}$$

La presión externa calculada mediante el método gráfico es similar a la presión externa definida inicialmente. Por tanto, el espesor del recipiente cilíndrico será de 6 mm.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES - ACERO INOXIDABLE													
P-No. 8 Grupo No. 1													
TABLA 1						TABLA 3							
COMPOSICION NOMINAL, 18 Cr - 8 Ni	Cedencia min. 30 000 lb/pulg ² Tension min. 75 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas	COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo.	Cedencia min. 30 000 lb/pulg ² Tension min. 75 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas		
		Placa	SA-240	304	2 3			Placa	SA-240	316	2 3		
		Tubo s/c	SA-213	TP304	2			Placa	SA-240	317	2 3		
		Tubo s/c	SA-213	TP304H	—			Tubo s/c	SA-213	TP316	2		
		Tubo /sc	SA-312	TP304	2			Tubo s/c	SA-213	TP316H	—		
		Tubo s/c	SA-312	TP304H	—			Tubo s/c	SA-312	TP316	2		
		Tubo s/c	SA-376	TP304	2			Tubo s/c	SA-312	TP316H	—		
		Tubo s/c	SA-376	TP304H	—			Tubo s/c	SA-312	317	2		
		Tubo vaciado	SA-452	TP304H	—			Tubo s/c	SA-376	TP316	2		
		Forj.	SA-182	F304	2			Tubo s/c	SA-376	TP316H	—		
Forj.	SA-182	F304H	—	Tubo vaciado	SA-452	TP316H	—						
Barra	SA-479	304	2 3 5	Forj.	SA-182	F316	2						
					Forj.	SA-182	F316H	—					
					Barra	SA-479	316	2 3 5					
COMPOSICION NOMINAL, 18 Cr - 8 Ni	Cedencia 25 000 Tension 70 000	TABLA 2				COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo.	Cedencia 25 000 Tension 70 000	TABLA 4					
		Producto	No. de Espec.	Grado	Notas			Producto	No. de Espec.	Grado	Notas		
		Placa	SA-240	304L	—			Placa	SA-240	316L	—		
		Tubo s/c	SA-213	TP304L	—			Tubo s/c	SA-213	TP316L	—		
		Tubo s/c	SA-312	TP304L	—			Tubo s/c	SA-312	TP316L	—		
Forj.	SA-182	F304L	—	Forj.	SA-182	F316L	4						
Barra	SA-479	304L	5	Barra	SA-479	316L	5						
VALORES MAXIMOS DE ESFUERZO PERMITIDO, 1 000 lb/pulg ²													
MATERIA- LES DE LA TABLA	PARA TEMPERATURAS DEL METAL NO MAYORES DE, GRADOS F												
	-20-100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	NOTAS
	1	18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.5	15.2	14.9	14.7
	18.8	15.7	14.1	12.9	12.1	11.4	11.2	11.1	10.8	10.6	10.4	10.2	
2	15.7	15.7	15.3	14.7	14.4	14.0	13.7	13.5	13.3	13.0	—	—	1
	15.7	13.4	12.0	11.0	10.3	9.7	9.5	9.4	9.2	9.1	—	—	
3	18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	1
	18.8	16.2	14.6	13.4	12.5	11.8	11.6	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8	
4	15.7	15.7	15.7	15.5	14.4	13.5	13.2	12.9	12.6	12.4	12.1	—	1
	15.7	13.3	11.9	10.8	10.0	9.4	9.2	9.0	8.8	8.6	8.4	—	
MATERIA- LES DE LA TABLA	PARA TEMPERATURAS DEL METAL NO MAYORES DE, GRADOS F												
	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	
1	14.4	13.8	12.2	9.8	7.7	6.1	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8	1.4	1
	10.0	9.8	9.5	8.9	7.7	6.1	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8	1.4	
3	15.4	15.3	14.5	12.4	9.8	7.4	5.5	4.1	3.1	2.3	1.7	1.3	1
	10.7	10.6	10.5	10.3	9.3	7.4	5.5	4.1	3.1	2.3	1.7	1.2	
NOTAS:													
1. Estos valores de esfuerzo mayores exceden en 2/3, pero no exceden del 90% de la resistencia a la cedencia a tal temperatura. El uso de estos valores puede producir cambios dimensionales debidos a la deformación permanente. No se recomiendan estos valores de esfuerzo para bridas ni juntas empacadas ni en otras aplicaciones en las que una deformación ligera pueda ocasionar fuga o mal funcionamiento.													
2. A temperaturas superiores a 100°F, estos valores de esfuerzo se aplican solamente cuando se tiene 0.04% de carbono o más.													
3. Para temperaturas superiores a 100°F, estos valores de esfuerzo pueden usarse sólo si el material se trata térmicamente, calentándolo a una temperatura mínima de 1 900°F y enfriándolo rápidamente en agua o por algún otro medio.													
4. Resistencia mínima especificada a tensión, 65.0 lb/pulg ² .													
5. El uso de tablas de presión externa para el material en forma de barra de medidas estándares se permite únicamente para anillos atornillados.													

Figura AVI.1. Valores de esfuerzos permitido de los acero inoxidable
(Megyesy, 1989, p. 160)

Dimensionamiento del fondo

Para el fondo del reactor se seleccionó una cabeza torisférica como se muestra en la figura AVI.2.

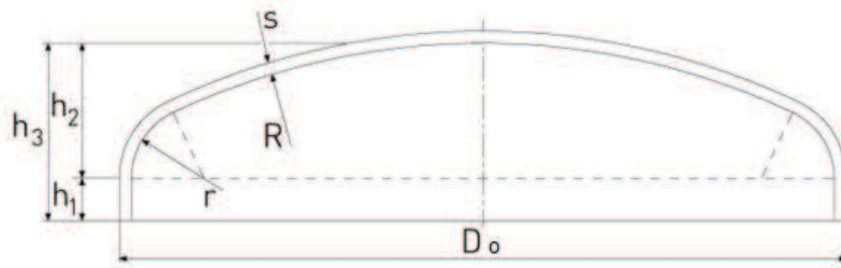


Figura AVI.2. Cabeza torisférica
(Weisstaler, 2013)

Para este tipo de fondo se tienen las siguientes relaciones:

$$R=D_o \quad [AVI.7]$$

$$r=0,1D_o \quad [AVI.8]$$

$$h_1=3,5s \quad [AVI.9]$$

$$h_2=0,1935D_o-0,455s \quad [AVI.10]$$

$$h_3=h_1+h_2 \quad [AVI.11]$$

Donde,

R =Diámetro externo,

s = espesor

- Cálculo del espesor considerando la presión interna

El espesor del fondo se calculó con la misma presión interna del recipiente cilíndrico, mediante la ecuación AVI.12 que se muestra en la figura AVI.3.

$$t_f = \frac{P_{\text{interna}} R M}{2 S E - 0,2 P_{\text{interna}}} \quad [AVI.12]$$

Donde

M = coeficiente

R =diámetro externo, m

S= esfuerzo permitido, atm

E=eficiencia de la soldadura

El valor de M se determinó en la con la relación:

$$\frac{D_o}{r} = 10$$

$$M = 1,54$$

$$t_f = \frac{1,24 \text{ atm} \times 1,303 \text{ m} \times 1,54}{2 \times 758,64 \text{ atm} \times 0,85 - 0,2 \times 1,24 \text{ atm}} = 0,002 \text{ m}$$

Considerando la corrosión

$$t = t_f + c = 0,004 \text{ m}$$

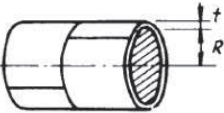
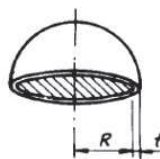
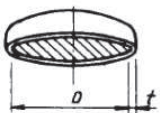
PRESION INTERNA		
FORMULAS EXPRESADAS EN FUNCION DE LAS DIMENSIONES INTERIORES		
<p> P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, lb/pulg² S = Valor del esfuerzo del material, lb/pulg², página 159 E = Eficiencia de la junta, página 142 R = Radio interior, pulgadas D = Diámetro interior, pulgadas t = Espesor de pared, pulgadas C.A. = Margen por corrosión, pulgadas </p>		
A 	CASCO CILINDRICO (COSTURA LONGIT.)¹	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$
<p>1. Generalmente rige el esfuerzo en la costura longitudinal. Ver página anterior.</p> <p>2. Cuando el espesor de pared exceda de la mitad del radio interior o P exceda de 0.385 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice del Código, 1-2.</p>		
B 	ESFERA Y CABEZA HEMISFERICO	
	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$
<p>1. Para las cabezas sin brida recta, úsese la eficiencia de la junta de la cabeza al casco si es menor que la eficiencia de las costuras de la cabeza.</p> <p>2. Cuando el espesor de pared exceda de 0.356 R, o P exceda de 0.665 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice 1-3 de las normas.</p>		
C 	CABEZA ELIPSOIDAL 2:1	
	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$
<p>1. Para las cabezas elipsoidales cuya relación del eje mayor al eje menor sea diferente de 2:1, véase el Apéndice 1-4 (c) de las normas.</p>		

Figura AVI.3. Presión interna en casco cilíndrico (Megyesy, 1989, p. 18)

- Cálculo del espesor considerando la presión externa

Se calculó el espesor para las condiciones de presión externa, para lo cual se determinó con la presión de la carga a la que está sometido el fondo y se consideró un factor de seguridad del 20 %.

La presión del fondo se calculó con la ecuación AVI.13

$$P_{\text{fondo}} = \frac{mg}{S_f} \quad [\text{AVI.13}]$$

Donde,

m= masa reaccionante, kg

g=gravedad, m/s²

S_f= superficie del fondo, m²

Para el cálculo de la superficie del fondo con la ecuación AVI.14 y se asumió un espesor s=0,004 m

$$S_f = 2\pi R h_f - \frac{\pi}{4} D_s^2 \quad [\text{AVI.14}]$$

Donde,

R=D_o, m

H_f=altura fondo, m

D_s=diámetro del orificio de salida del producto, m

$$h_f = 0,1935D_o - 0,455s - r \cos \alpha$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\frac{D_o}{2} - s - r}{R - r} \right)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\frac{1,303}{2} - 0,004 - 0,13}{1,303 - 0,13} \right)$$

$$\alpha=26,17$$

$$h_f=0,133 \text{ m}$$

Con el valor h_f , se calculó S_f :

$$S_f=2\pi \times 1,303 \times 0,133 - \frac{\pi}{4} (0,254)^2$$

$$S_f=1,04 \text{ m}^2$$

S_f se reemplazó en la ecuación y se calculó la presión en el fondo:

$$P_{\text{fondo}} = \frac{2000 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1,04 \text{ m}^2}$$

$$P_{\text{fondo}}=18829,97 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{fondo}}=0,186 \text{ atm}$$

$$P_{\text{externa}}=P_{\text{fondo}}+P_{\text{atmosférica}}$$

$$P_{\text{externa}}=0,906 \text{ atm}$$

Método gráfico:

$$\frac{D_o}{t}=325,7$$

Con la relación anterior se determinó el factor A con la ecuación AVI.15:

$$A = \frac{0,125}{\left(\frac{D_o}{t} \right)} \quad [\text{AVI.15}]$$

$$A=3,84 \times 10^{-4}$$

Hallado A, se encontró el factor B en la figura AVI.6

$$\text{Factor B}=5200$$

El valor de la presión externa se calculó con ecuación AVI.16 que se muestra en la figura AVIII.4.:

$$P_{\text{externa}} = \frac{B}{\left(D_o/t\right)} \quad [\text{AVI.16}]$$

$$P_{\text{externa}} = 1,08 \text{ atm}$$

$$s = 4 + c = 6 \text{ mm}$$

La presión externa calculada mediante el método gráfico es similar a la presión externa definida inicialmente. Por tanto, el espesor del recipiente cilíndrico será de 6 mm.

$$h_1 = 0,021 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,249 \text{ m}$$

$$h_3 = 0,270 \text{ m}$$

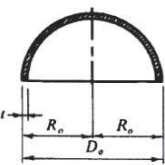
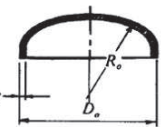
PRESION EXTERNA	
FORMULAS	
NOTACION P = Presión externa de diseño, lb/pulg ² manom. P_s = Presión máxima de trabajo permitida, lb/pulg ² manom. D_o = Diámetro exterior de la cabeza, pulg. R_o = Radio exterior de la esfera o cabeza hemisférica, 0.9 D_o para cabezas elipsoidales, radio por dentro de la corona de las cabezas bridadas y abombadas, pulg. t = Espesor mínimo requerido de pared, pulgadas. E = Módulo de elasticidad del material, lb/pulg ² (página 41)	
	ESFERA Y CABEZA HEMISFERICA Presión máxima permitida: $P_s = \frac{B}{(R_o/t)}$ El valor de B se determina por el siguiente procedimiento: 1. Suponga un valor para t y calcule el valor de A usando la fórmula: $A = 0.125/(R_o/t)$ (ver página 47) 2. Con el valor de A entre a la gráfica del material aplicable páginas 41-45). Siga verticalmente hasta la línea de temperatura aplicable.* 3. Desde la intersección, desplácese horizontalmente y lea el valor de B . *Para los valores de A que caigan a la izquierda de la línea de temperatura aplicable, el valor de P_s puede calcularse por la fórmula: $P_s = 0.0625 E/(R_o/t)^2$ Si la presión máxima de trabajo permitida P_s , calculada por la fórmula anterior, es menor que la presión de diseño, debe tomarse un valor más grande para t y repetir el procedimiento de cálculo.
	2:1 CABEZA ELIPSOIDAL El espesor requerido será el mayor de los siguientes espesores: (1) El espesor calculado por las fórmulas dadas para presión interna usando una presión de diseño de 1.67 veces la presión externa y una eficiencia de junta $E = 1.00$. (2) El espesor comprobado por la fórmula $P_s = B/(R_o/t)$ en la cual $R_o = 0.9 D_o$, y B determinada como para la esfera.
	CABEZA ASME BRIDADA Y ALABEADA (CABEZA TORISFERICA) El espesor requerido y la presión máxima permitida se calcularán por los procedimientos dados para cabezas elipsoidales. (Ver arriba) R_o máximo = D_o

Figura AVI.4. Presión externa en una cabeza torisférica (Megyesy, 1989, p. 34)

Dimensionamiento de la tapa

- Cálculo del espesor considerando la presión interna

$$P_{\text{interna}} = 0,864 \text{ atm}$$

El espesor de la tapa se calculó con la ecuación.

$$t_t = 0,001 \text{ m}$$

$$t = t_t + c = 0,003 \text{ m}$$

- Cálculo del espesor considerando la presión externa

$$P_{\text{externa}} = 0,72 \text{ atm}$$

Método gráfico

Asumo un espesor $s = 0,003 \text{ m}$

$$\frac{D_o}{t} = 434,27$$

Con la relación anterior se determinó el factor A con la ecuación AVI.15.

$$A = 2,88 \times 10^{-4}$$

Hallado A, se encontró el factor B en la

$$B = 4600$$

El valor de la presión externa se calculó con la ecuación AVI.13.

$$P_{\text{externa}} = 0,721 \text{ atm}$$

$$s = 3 + c = 5 \text{ mm}$$

La presión externa calculada mediante el método gráfico es similar a la presión externa definida inicialmente. Por tanto, el espesor del recipiente cilíndrico será de 5 mm.

$$h_1 = 0,018 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,250 \text{ m}$$

$$h_3 = 0,267 \text{ m}$$

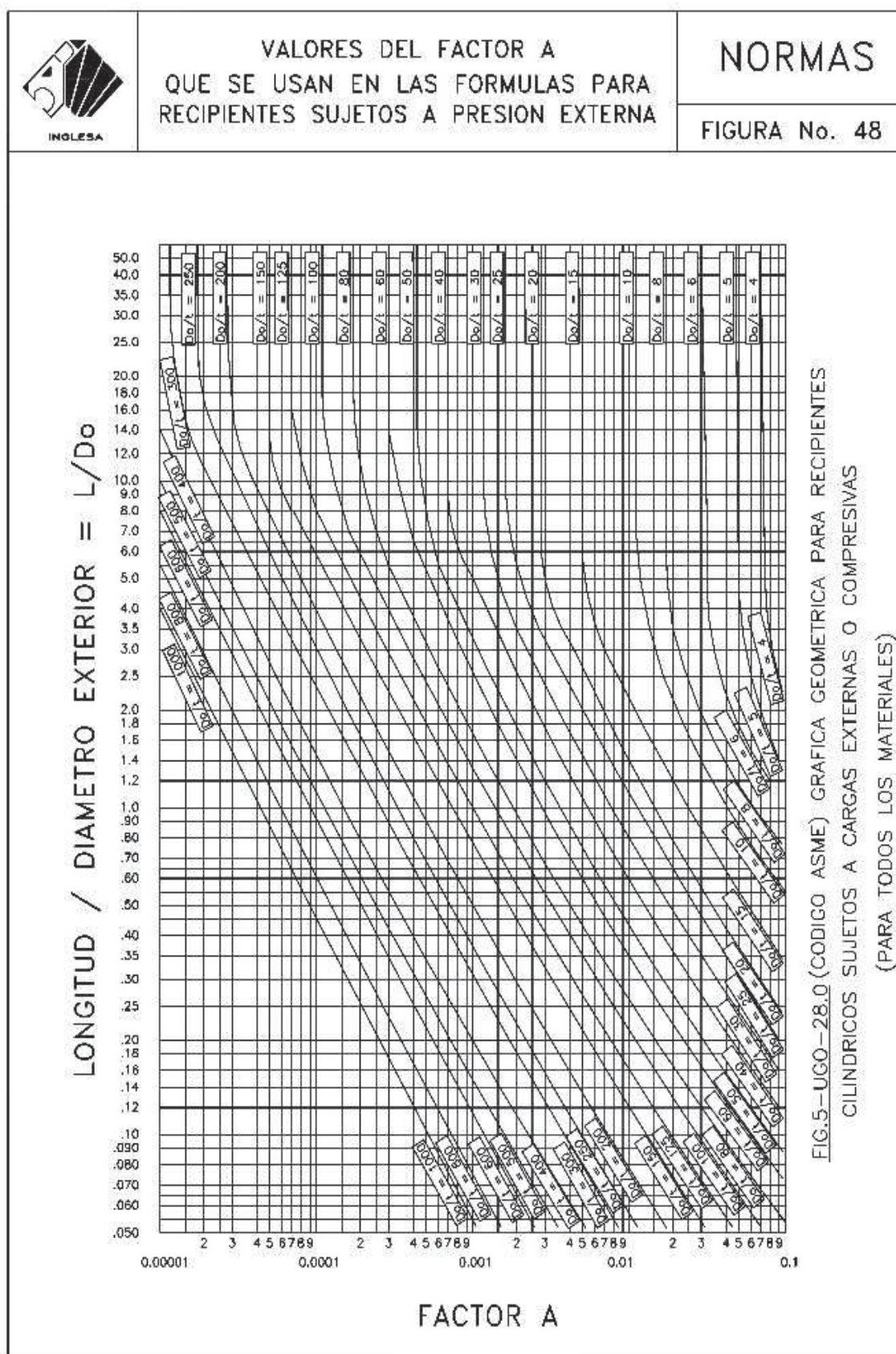


Figura AVL5. Determinación del factor A
(León, 2001, p. 102)



LOS VALORES DEL FACTOR B
QUE SE EMPLEAN EN LAS FORMULAS PARA
RECIPIENTES SUJETOS A PRESION EXTERNA

NORMAS

FIGURA No. 52

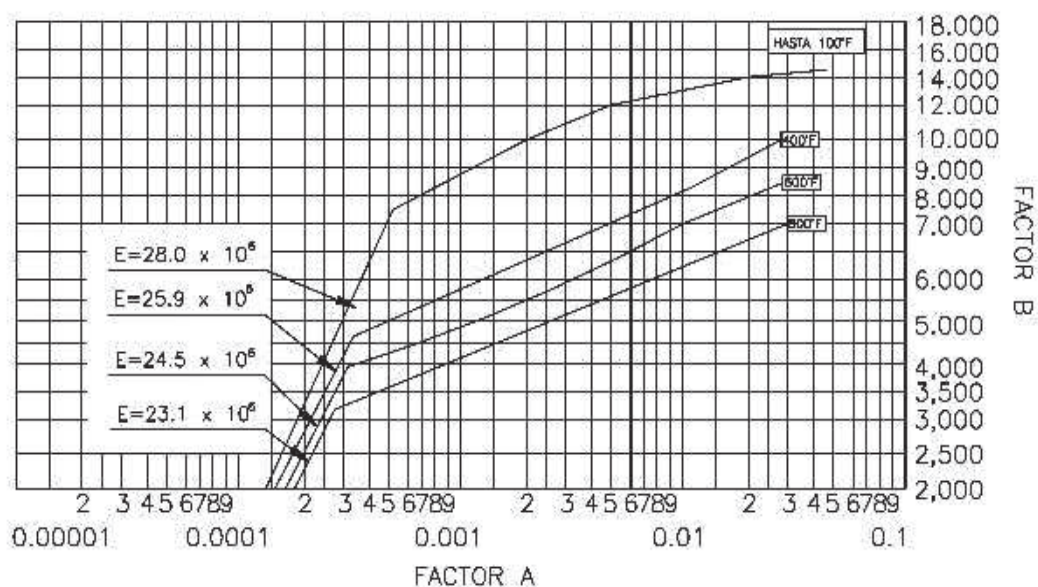


FIG. 5-UHA-28.3 GRAFICA PARA DETERMINAR ESPESORES DE ENVOLVENTES DE RECIPIENTES CILINDRICOS Y ESFERICOS SUJETOS PRESION EXTERNA CONS-TRUIDOS DE ACERO AUSTENITICO (18Cr.-8Ni-0.03 MAXIMO DE CARBONO, TIPO 304L) (VER TABLA UHA-23).

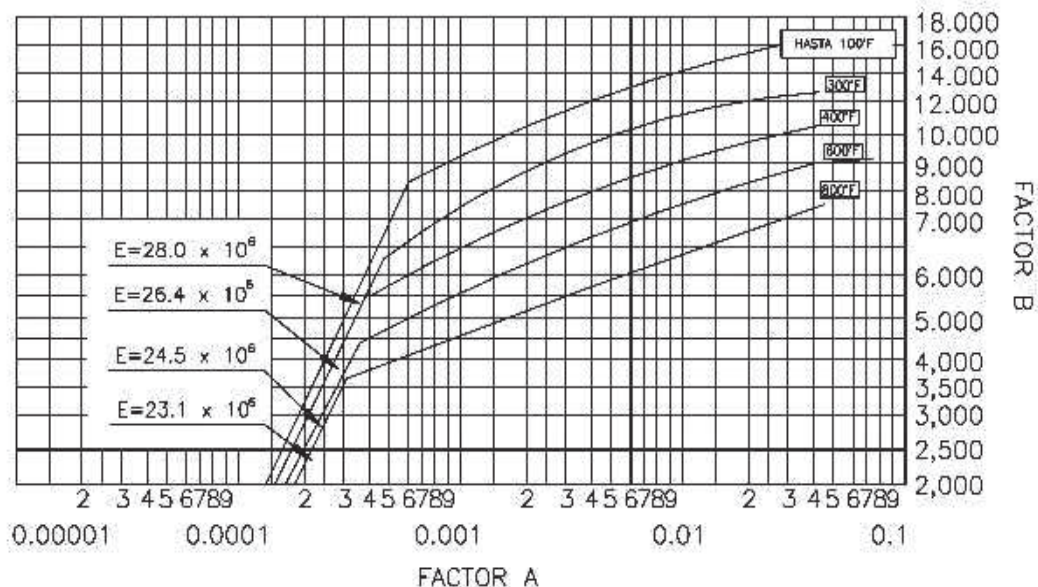


FIG. 5-UHA-28.4 GRAFICA PARA DETERMINAR ESPESORES DE ENVOLVENTES DE RECIPIENTES CILINDRICOS Y ESFERICOS SUJETOS PRESION EXTERNA CONS-TRUIDOS DE ACERO AUSTENITICO (18Cr.-8Ni-Mo-0.03 MAXIMO DE CARBON, TIPO 316L, 317L) (VER TABLA UHA-23).

Figura AVI.6. Determinación del factor B
(León, 2001, pp. 103-104)

Sistema de agitación:

Las dimensiones del agitador tipo turbina se determinaron con las relaciones

$$\frac{D_a}{D} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{E}{D_a} = 1$$

$$\frac{w}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{H}{D_t} = 1$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Donde,

Da= diámetro del agitador

D= diámetro interno

E= altura desde el agitador hasta el fondo del tanque

J= ancho de los deflectores

L= largo de la hoja del agitador

W= Ancho de la hoja del agitador

R= número de deflectores

$$R = 4$$

$$D_a = 0,432 \text{ m}$$

$$J = 0,108 \text{ m}$$

$$W = 0,086 \text{ m}$$

$$L = 0,108 \text{ m}$$

$$E = 0,432 \text{ m}$$

$$H = 1,295 \text{ m}$$

- Cálculo de la potencia del agitador

La potencia del agitador se calculó con la ecuación AVI.17:

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5$$

[AVI.17]

Donde,

N_p = número de potencia

ρ = densidad del fluido, kg/m^3

N = número de revoluciones, 1/s

D_a = diámetro del agitador, m

N_p se estimó en la figura AVI.7 con la curva 4 y el Re .

El número de Reynolds se obtuvo con la ecuación AVI.18:

$$Re = \frac{n D_a^2 \rho}{\mu} \quad [AVI.18]$$

Donde,

n = revoluciones, s

D_a = diámetro del agitador, m

ρ = densidad del fluido, kg/m^3

μ = viscosidad del fluido, $kg/m.s$

$$Re = \frac{150 \times (0.432)^2 m^2 \times 1220 \frac{kg}{m^3}}{60s \times 0,1719 \frac{kg}{m.s}}$$

$Re = 33051,89$

Se determinó un $N_p = 6$

Y se calculó la potencia

$P = 1713 \text{ W}$

$P = 2,3 \text{ HP}$

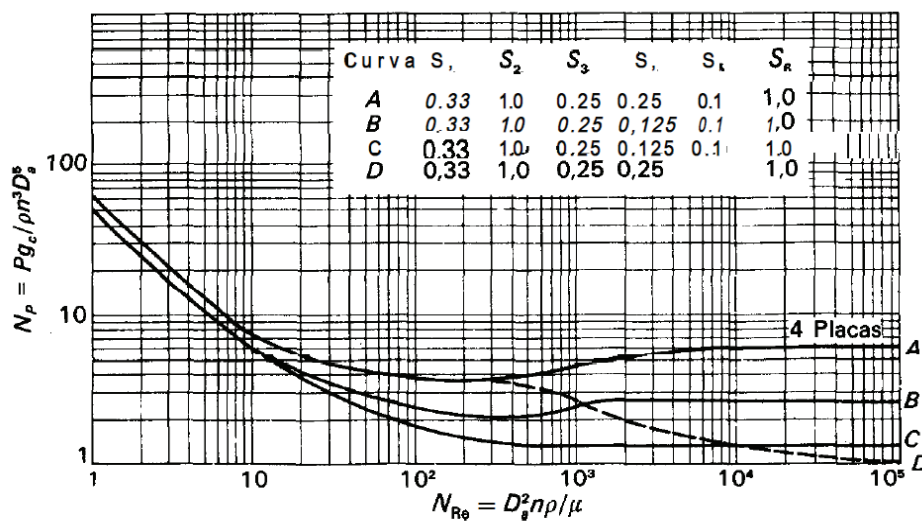


Figura AVI.7. Cálculo del número de potencia
(Harriott et al, 1998, p. 259)

Sistema de calentamiento:

- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor se determinó con la ecuación AVI.19

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_j} \quad [\text{AVI.19}]$$

Donde,

h_i = coeficiente de transferencia de calor interno, $\text{W/m}^2\text{°C}$

x = espesor de la pared de tanque, m

k = conductividad térmica del material del tanque, $\text{W/m}^0\text{C}$

h_j = coeficiente de transferencia de calor externo, $\text{W/m}^2\text{°C}$

- Cálculo del coeficiente de transferencia interno h_i

El coeficiente interno de transferencia de calor se calculó con las propiedades del etilenglicol que se indican en la

Tabla AVI.2. Propiedades del etilenglicol

Conductividad térmica	0,250 W/m.K
Densidad	981,164 kg/m ³
Viscosidad	0,084 Pa.s
Calor específico	2408,620 J/kg.K

El coeficiente global de transferencia de calor se determinó con la ecuación AVI.20

$$\frac{h_i D_T}{k} = 0,36 \left(\frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right) \quad [\text{AVI.20}]$$

Donde,

D_T = diámetro interno del tanque, m

K = conductividad térmica, W/mK

D_a = diámetro del agitador

N = velocidad del agitador, rps

ρ = densidad, kg/m³

C_p = calor específico, J/kg.K

μ = viscosidad, Pa.s

μ_w = viscosidad en la pared, Pa.s

$\mu=\mu_w$

Se calculó h_i para $N= 90$

$h_i= 141,53 \text{ W/m}^2\text{°C}$

- Cálculo del coeficiente de transferencia externo h_j

El coeficiente interno de transferencia de calor se calculó con las propiedades del aceite Dowtherm G a 195 °C que se indican en la

Tabla AVI.3. Propiedades del aceite

Conductividad térmica	0,250 W/m.K
Densidad	981,164 kg/m ³
Viscosidad	0,084 Pa.s
Calor específico	2408,620 J/kg.K

El coeficiente global de transferencia de calor se determinó con la ecuación de AVI.21 (Sieder-Tate).

$$\frac{h_j D_e}{k} = 0,027 \text{ Re}^{0,8} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_\infty} \right)^{0,14} \left(1 + 3,5 \frac{D_e}{D} \right) \quad [\text{AVI.21}]$$

Donde,

D_e = diámetro equivalente, m

ec =espesor chaqueta, m

K = conductividad térmica, W/mK

ρ = densidad, kg/m³

C_p = calor específico, J/kg.K

v = velocidad, m/s

μ = viscosidad, Pa.s

$\mu = \mu_\infty$

El número de Reynolds se obtuvo con la ecuación AVI.22:

$$Re = \frac{\rho v D_e}{\mu} \quad [\text{AVI.22}]$$

$$Re = 373068$$

El diámetro equivalente se calculó con la ecuación AVI.23:

$$D_e = \frac{(D_2)^2 - (D_1)^2}{D_1} \quad [\text{AVI.23}]$$

$$D_1 = D_o$$

$$D_2 = D_o + e_c$$

$$D_2 = 1,453 \text{ m}$$

$$D_e = 0,317 \text{ m}$$

Se despejo h_j de la ecuación

$$h_j = 2279,13 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

- Cálculo conductividad térmica del tanque

La conductividad del tanque se calculó con la conductividad térmica del material y el espesor de la pared.

$$\frac{x}{k} = \frac{0,006}{16,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}$$

$$\frac{x}{k} = 3,7 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Reemplazando los valores en la ecuación

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{141,53} + 3,7 \times 10^{-4} + \frac{1}{2279,13}$$

$$U = 126,99 \text{ W/m}^2\text{C}$$

En el dimensionamiento para el reactor de polimerización se utilizaron las mismas ecuaciones indicadas anteriormente y las propiedades del propilenglicol.

ANEXO VII

BALANCE DE MASA DEL PROCESO

En la Tabla AVII.1 se detalla el producto y la cantidad que entra y sale de cada operación.

Tabla AVII.1. Balance de masa de los productos por proceso

Proceso	Entra	Sale	Observación
Selección	500 kg PET	450 kg PET	Los 50 kg de desechos son de etiquetas e impurezas
		50 kg desechos	
Molienda	450 kg PET	450 kg PET	
Lavado	450 kg PET	450 kg PET	
Almacenamiento	450 kg PET	Se almacena por cargas	
Glicólisis	500 kg PET	1934,79 kg mezcla	EG: etilenglicol
	1226,46 kg EG		
	208,33 kg NaOH		
	1934,79 kg totales		
Solubilización	1934,79 kg mezcla	3934,79 kg solución	El agua es para solubilizar la mezcla de reacción
	2000 kg agua		
Filtración	3934,79 kg solución	3929,79 kg solución	5 kg impurezas se desechas
		5 kg impurezas	
Precipitación	3929,79 kg solución	4889,79 kg mezcla	Sol. HCL sirve para precipitar el ácido tereftálico e isoftálico.
	960 kg Sol HCL		
Centrifugación	4889,79 kg mezcla	500 kg depolimerizado	El sobrenadante corresponde al EG, el agua y la sol de HCL.
		4389,79 kg sobrenadante	
Secado	500 kg depolimerizado	500 kg depolimerizado	
Almacenamiento	500 kg depolimerizado	Por cargas	
Polimerización	500 kg depolimerizado	1300 kg poliéster	AM: anhídrido maléico PG: propilenglicol
	290 kg de AM		
	600 kg PG	90 kg agua	
	1390 kg totales		
Mezclado	1300 kg resina	2000 kg resina poliéster	El estireno se añade para diluir la resina
	700 kg estireno		

Balance de masa de agua

- Cálculo de la cantidad de agua necesaria para el lavado de las botellas

Dimensiones del Tanque:

Diámetro: 1,3 m

Altura: 1,8 m

Altura de agua: 1,4 m

$$V = \frac{\pi(1,3^2)}{4} (1,4) = 1,86 m^3$$

$$V = 1,86 \times 3 = 5,57 \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$5,57 \frac{m^3}{\text{día}} \times \frac{20 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = \frac{111,5 m^3}{\text{mes}}$$

- Cálculo de la cantidad de agua necesaria para la solubilización

Se requiere de 2000 kg agua = 2000 L = 2 m³

$$2 \frac{m^3}{\text{día}} \times \frac{20 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = \frac{40 m^3}{\text{mes}}$$

Total de agua:

$$\frac{111,5 m^3}{\text{mes}} + \frac{40 m^3}{\text{mes}} = \frac{151,5 m^3}{\text{mes}}$$

ANEXO VIII

CALCULOS REALIZADOS PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS

- **Silos de almacenamiento de sólidos**

Para el dimensionamiento del tanque se empleó el Apéndice A de la norma API 650-1998. Se dimensionó dos silos, uno para el PET molido y otro para el producto de la depolimerización del PET, el volumen que se tomó en cuenta fue el necesario para dos días de producción.

$$1000 \text{ kg PET} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1400 \text{ kg}} = 0,71 \text{ m}^3 \text{ PET}$$

Sobredimensionamiento 20%

$$V = 0,86 \text{ m}^3$$

$$1000 \text{ kg depolimerizado} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1522 \text{ kg}} = 0,66 \text{ m}^3 \text{ producto depolimerizado}$$

Sobredimensionamiento 20%

$$V = 0,79 \text{ m}^3$$

Características del tanque para sólidos:

- Cabeza: elipsoidal 2:1
- Fondo: cónico
- Carcasa: cilíndrica

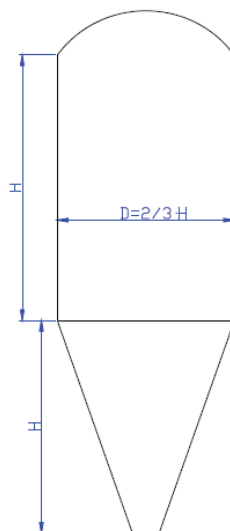


Figura AVIII.1. Dimensiones del silo de almacenamiento de sólidos según la norma API 650-1998

$$\text{Volumen}_{\text{tanque}} = \text{Volumen}_{\text{cilindro}} + \text{Volumen}_{\text{cono}} + \text{Volumen}_{\text{cabeza}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{cilindro}} = \pi R^2 H$$

$$\text{Volumen}_{\text{cono}} = \frac{1}{3} \pi R^2 h_{\text{cono}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{cabeza}} = \frac{1}{6} \pi D^2 h_{\text{cabeza}}$$

$$D = \frac{2}{3} H = 0,8 \text{ m}$$

Tabla AVIII.1. Dimensiones de los silos de almacenamiento

Producto	PET molido	Depolimerizado
Volumen producto	0,86 m ³	0,79 m ³
H cilindro	1,20 m	1,17 m
D cilindro	0,80 m	0,78 m
h cono	1,20 m	1,17 m
h cabeza	0,20 m	0,20 m
Volumen cilindro	0,60 m ³	0,56 m ³
Volumen cono	0,20 m ³	0,19 m ³
Volumen cabeza	0,07 m ³	0,06 m ³
Volumen tanque	0,87 m ³	0,81 m ³

- **Silos de almacenamiento de líquidos**

Para el dimensionamiento del tanque se empleó el Apéndice A de la norma API 650-1998 y se tomó en cuenta el volumen de resina poliéster producida en un día.

$$2000 \text{ kg resina poliéster} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1400 \text{ kg}} = 1,43 \text{ m}^3$$

Sobredimensionamiento 20%

$$V = 1,71 \text{ m}^3$$

Características del tanque para líquidos:

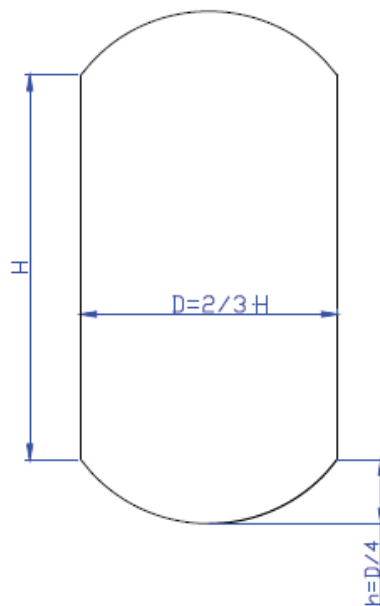


Figura AVIII.2. Dimensiones del tanque de almacenamiento para líquidos según la norma API 650-1998

Cabeza y fondo: elipsoidal 2:1

Carcasa: cilíndrica

$$\text{Volumen}_{\text{tanque}} = \text{Volumen}_{\text{cilindro}} + 2\text{Volumen}_{\text{cabeza}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{cilindro}} = \pi R^2 H$$

$$\text{Volumen}_{\text{cabeza}} = \frac{1}{6} \pi D^2 h_{\text{cabeza}}$$

Tabla AVIII.2. Dimensiones del tanque de almacenamiento de resina poliéster

Producto	PET molido
Volumen producto	1,71 m ³
H cilindro	1,60 m
D cilindro	1,07 m
h cabeza	0,27 m
Volumen cilindro	1,43 m ³
Volumen cabeza	0,16 m ³
Volumen tanque	1,75 m ³

ANEXO IX

HOJAS DE ESPECIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS

Tabla AIX.1. Hoja de especificación de la línea de triturado, lavado y secado

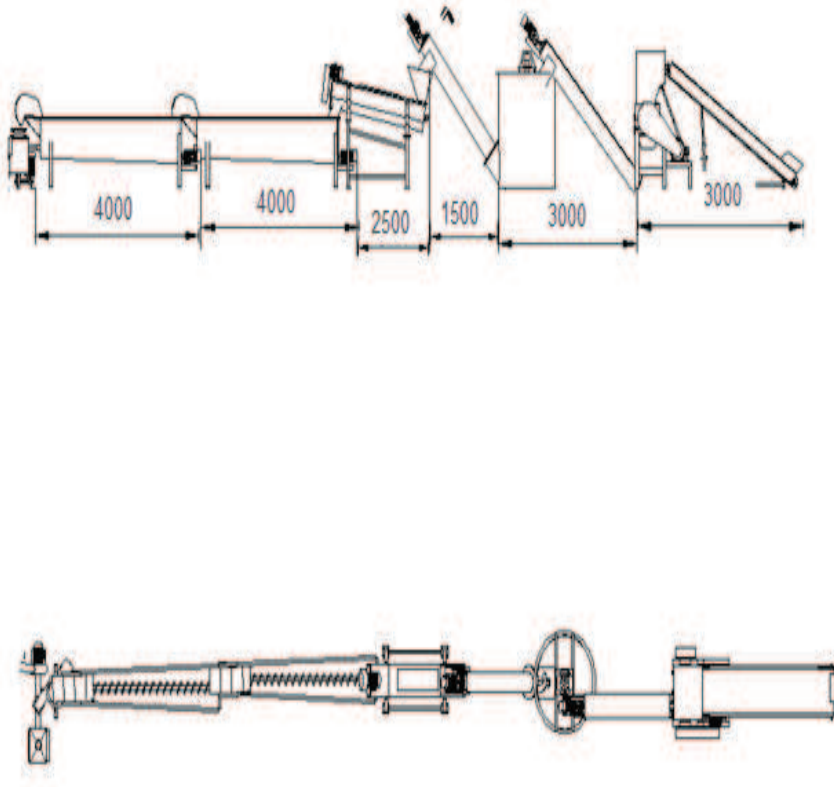
HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 2		
Nombre del Equipo	LÍNEA DE TRITURAD, LAVADO Y SECADO DE BOTELLAS	
Identificación	Fabricante: Maquinarias Grijalva & Yerovi	Numero requerido: 1
Función	Triturar las botellas de PET, lavar el PET molido y secado de las escamas de PET molido	
Operación	Continuo	
Material de fabricación	Acero al carbono	
Datos de Diseño	La línea consta de: Banda Transportadora Molino FS650	Lavador de Agua Caliente Auto escurridor Panel de Control secado
Esquema		

Tabla AIX.2. Hoja de especificación de los silos de almacenamiento


HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 3		
Nombre del Equipo	SILO DE ALMACENAMIENTO	
Identificación	Fabricante: Sematec	Numero requerido: 2
Función	Almacenamiento de PET molido y depolimerizado	
Operación	Por cargas	
Material de fabricación	Acero inoxidable	
Datos de Diseño	<p>Silo 1: PET molido</p> <p>Carcasa Altura: 1,2 m Diámetro: 0,8 m</p> <p>Fondo Altura: 1,2 m Orificio salida: 0,005 m</p> <p>Cabeza elipsoidal Altura: 0,2 m Espesor: 3 mm</p>	<p>Silo 2: depolimerizado</p> <p>Carcasa Altura: 1,17 m Diámetro: 0,78 m</p> <p>Fondo Altura: 1,17 m Orificio salida: 0,005 m</p> <p>Cabeza elipsoidal Altura: 0,2 m Espesor: 3 mm</p>
Esquema		

Tabla AIX.3. Hoja de especificación del reactor para la depolimerización

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 4		
Nombre del Equipo	REACTOR PARA DEPOLIMERIZACIÓN	
Identificación	Fabricante: Foshan JCT Machinery Modelo: 2000 L	Numero requerido: 1
Función	Reactor para la depolimerización del PET	
Operación	Por cargas	
Material de fabricación	Acero inoxidable	
Datos de Diseño	Dimensiones cilindro: Altura:1,5 m Diámetro: 1,3 m Espesor: 8 mm Agitador : paleta Potencia: 5,5 KW	
Esquema		

Tabla AIX.4. Hoja de especificación de los tanques de agitación


HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 5			
Nombre del Equipo	TANQUE DE AGITACIÓN		
Identificación	Fabricante: Wenzhou Guoshun Fluid Equipment		Número requerido: 3
Función	Tanque para solubilización del producto depolimerizado Tanque para la agitación de mezcla de ácido tereftálico y etilenglicol Tanque para la agitación de resina poliéster con estierno		
Operación	Por cargas		
Material de fabricación	Acero inoxidable		
Datos de Diseño	Tanque 1 4500 L Altura:2,0 m Diámetro:1,7 m Espesor:4 mm Potencia: 5,5 KW	Tanque 2 7000 L Altura:2,2 m Diámetro:2,0 m Espesor:4 mm Potencia: 11 KW	Tanque 3 2000 L Altura:1,5 m Diámetro:1,7 m Espesor:4 mm Potencia: 5 KW
Esquema			

Tabla AIX.5. Hoja de especificación de la centrífuga


HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 7		
Nombre del Equipo	CENTRIFUGA	
Identificación	Fabricante: Liaoyang Zhonglian Pharmaceutical Machinery Modelo: DHY400	Numero requerido: 1
Función	Separación de una mezcla de ácido tereftálico y etilenglicol	
Operación	Por cargas	
Material de fabricación	Acero inoxidable	
Datos de Diseño	Capacidad: 1000 kg Velocidad: 6525 rpm Potencia: 11 KW	
Esquema		

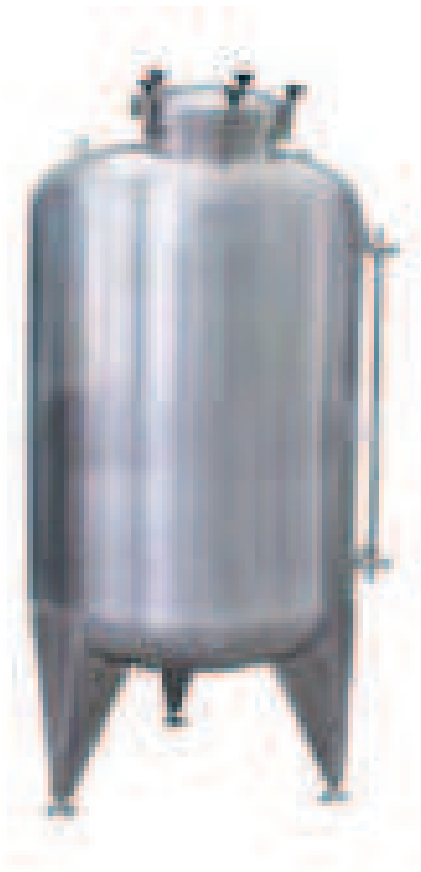
Tabla AIX.6. Hoja de especificación del secador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 8		
Nombre del Equipo	SECADOR	
Identificación	Fabricante: Dongguan Yuanyao Electronics Technology Modelo: YPO-600	Numero requerido: 1
Función	Secar el producto obtenido de la glicólisis alcalina del PET	
Operación	Batch	
Material de fabricación	Acero inoxidable	
Datos de Diseño	Largo: 1750 mm Altura: 1400 mm Ancho: 840 mm Potencia: 5 KW	
Esquema		

Tabla AIX.7. Hoja de especificación del reactor para la polimerización de la resina poliéster


HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 10		
Nombre del Equipo	REACTOR PARA POLIMERIZACIÓN	
Identificación	Fabricante: Foshan JCT Machinery Modelo: 1500 L	Numero requerido: 1
Función	Reactor para la síntesis de resina poliéster insaturada	
Operación	Por cargas	
Material de fabricación	Acero inoxidable	
Datos de Diseño	Dimensiones cilindro: Altura: 1,2 m Diámetro: 1,2 m Espesor: 8 mm Agitador : paleta Potencia: 5,5 KW	
Esquema		

Tabla AIX.8. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento de la resina poliéster


HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 11		
Nombre del Equipo	TANQUE D E ALMACENAMIENTO	
Identificación	Fabricante: Sematec	Numero requerido: 1
Función	Almacenamiento de PET molido	
Operación	Batch	
Material de fabricación	Acero inoxidable	
Datos de Diseño	Carcasa Altura: 1,6 m Diámetro:1,0 m Cabeza elipsoidal Altura:0,2 m Espesor: 3 mm	
Esquema		

ANEXO X

COTIZACIONES DE LA MATERIA PRIMA Y EQUIPOS



RECICLAR
LA ESPERANZA DE UN MUNDO SIN CONTAMINACIÓN



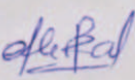
PLASTRECYCLING
EMPRESA DE RECUPERACIÓN DE PLÁSTICOS

PROFORMA 16-10-13

CLIENTE: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL CONTACTO: Alexandra Padilla email: alexandra.padilla@est.epn.edu.ec	FECHA EMISIÓN: 16-oct-13 CONDICIONES DE PAGO: CONTADO
--	--

CANTIDAD	DETALLE	VALOR	TOTAL
500	KILOS DE BOTELLA PET	1,80	900,00
		SUBTOTAL	900,00
		12 % IVA	108,00
		TOTAL	1008,00


Atentamente,



Ing. Natalia Hermida B.
PLASTRECYCLING
RECICLAR CIA. LTDA.

Sucursal: José Andrade OE1-512 y Joaquín Mancheno, Carcelén Industrial. Telf.: 2801 028 / 2473 902 * E-mail: plast@reciclar.com.ec
 Matriz: José Andrade OE1-24 y Vicente Duque • Telefax: 2473-233 / 2482-797 / 2482-798 / 2805-723
 E-mail: info@reciclar.com.ec • Quito - Ecuador.
www.reciclar.com.ec

Figura AX.1. Cotización de la paca de PET

 **REUSE ECUADOR S.A.** <reuseecuador@yahoo.com>
mié 23/10/2013 01:45 p.m.

Para: L. PADILLA ALOMOTO ALEXANDRA ELIZABETH
Cc: L. Girma Arias <girmaluz@yahoo.com>
• Respondiste el 23/10/2013 04:05 p.m.

Buenas tardes Srta. Padilla, a continuación detallo proforma solicitada...

PROFORMA			
PRODUCTOS	PRECIOS X KILO	CANTIDAD	NETO
PROPILENGLICOL (TAMBOR DE 215 KGS.)	2.64	1,290.00	3,405.60
MONOETILENGLICOL (TAMBOR DE 235 KGS.)	2.10	1,410.00	2,961.00
ESTIRENO (TAMBOR DE 185 KGS.)	2.80	1,110.00	3,108.00
ANHIDRIDO MALEICO (SACOS 25 KGS.)	2.80	300.00	840.00
		SUBTOTAL	10,314.60
CONTADO		12%	1,237.75
		TOTAL	11,552.35

Por favor si tiene alguna inquietud no dude en llamarnos y estaremos gustosos en atenderle...


Atte.

Lic. Girma Arias

Reuse Ecuador S. A.
Km 10.5 Vía a Daule. Acacias y Cedro S/N (atrás del colegio Leonidas García)
PBX: +593-600-9044
Telefax: +593-4-2114 230 // 2-114 231
Celular: +593-99-743-5616
Guayaquil-Ecuador

Figura AX.2. Cotización de los glicoles, anhídrido maleico y estireno

173



DISAN ECUADOR S.A.
RUC:1791338693001
Direccion: De los Ciruelos Oel-300 entre Av. Galo Plaza Lasso
y Av. Real Audiencia
PBX: 604 6596 / 6030370 / 6030371

FACTURA PROFORMA

CODIGO	PRODUCTO	CANTIDAD Kg.	VALOR \$	VALOR \$ TOTAL
386	Propilenglicol USP/EP - Dow - tm215	1200	3	3600,00
213	Soda Caustica Escamas - POL - sc25	200	1,05	210,00
SUB TOTAL			US	3810,00
TARIFA IVA 12%			US	457,200
TOTAL			US	4267,200

OBSERVACIONES: VALIDO 5 DIAS
Propilenglicol USP/EP - Dow (Disponibilidad en Noviembre)
Soda Caustica Escamas Polaca (Disponibilidad Inmediata)

Ing. Patricia Mena Zurita
patricia.mena@disan.com.ec
Cel: 0994962542

Figura AX.3. Cotización del hidróxido de sodio



MAQUINARIAS GRUJALVA & YEROVICIA, LTDA.
SOLUCIONES Y EQUIPOS DE MAQUINARIA A PARTIR DE MAQUINAS DE TRUCCO



PROFORMA

Señores:	Escuela Politécnica Nacional
Atención:	Srta Alexandra Padilla
E-Mail:	alexandra.padilla@est.epn.edu.ec
FECHA:	09/10/2013

No.	Name Commodity & Specification	Unit price /USD	Quantit y /set	Total /USD
1	Línea de Triturado, Lavado y Secado de Botellas PET	32.000	1	32.000

Excluye IVA

Forma de Pago: 50% Anticipo 50% contra Entrega

Tiempo de Entrega: 45 días laborables

300kg/h PET bottles washing dewatering and drying line



Maquinarias Grujalva & Yerovia Ltda. (Guayaquil) - Teléfonos: 041 3617 / 0999 945 738 / 0999 720 909 - www.grujalvayerovia.com

Figura AX.4. Cotización de la línea de triturado, lavado y secado de las botellas de PET

Foshan JCT Machinery Co., Ltd

Foshan JCT Machinery Co., Ltd

2000L UNSATURATED POLYESTER RESIN PRODUCTION LINE

NO	NAME	SPECIFICATION, MATERIAL, TYPE	QTY	PRICE (USD)
1	Reactor	2000 liter	1	15570
2	Dephlegmator	DN200	1	3440
3	Horizontal condenser	10 m ²	1	4260
4	Oil and water separator	0.12 m ³	1	1470
5	High metering tank	0.3 m ³	1	1630
6	Dilution tank	3000 liter	1	14090
7	Vertical condenser	6m ²	1	2620
TOTAL		USD 43080		

NOTE:

1. This price is only for the equipment that listed above, it doesn't include the tubes fees and installing fees.
2. This price doesn't include freight.
3. This is manufacturer's price.
4. Any details can be negotiated.

Best Wishes
Nichole Zheng

Contact Information

Mobile: 86-18024157450
Tel: 86-757-86193648
Fax: 86-757-86193658
Email: jct158@fsjct.com
Website: www.fsjct.com or fsjct.en.alibaba.com

Alexandra Padilla
Escuela Politécnica Nacional
Chemical engineering projects assistant
e-mail: alexandra.padilla@est.epn.edu.ec
Tel: 593-983521530

JCT – your trustful partner in China!

Figura AX.5. Cotización del reactor de depolimerización

Foshan JCT Machinery Co., Ltd

Foshan JCT Machinery Co., Ltd

1500L UNSATURATED POLYESTER RESIN PRODUCTION LINE

NO	NAME	SPECIFICATION, MATERIAL, TYPE	QTY	PRICE (USD)
1	Reactor	1500 liter	1	14400
2	Dephlegmator	DN200	1	3950
3	Horizontal condenser	8 m ²	1	3600
4	Oil and water separator	0.08m ³	1	1300
5	High metering tank	0.3 m ³	1	1650
6	Dilution tank	2300 liter	1	13600
7	Vertical condenser	5m ²	1	2300
TOTAL		USD 40600		

NOTE:

1. This price is only for the equipment that listed above, it doesn't include the tubes fees and installing fees.
2. This price doesn't include freight.
3. This is manufacturer's price.
4. Any details can be negotiated.

Best Wishes

Nichole Zheng

Contact Information

Mobile: 86-18028192312

Tel: 86-757-86193648

Fax: 86-757-86193658

Email: jct158@fsjct.com

Website: www.fsjct.com or fsjct.en.alibaba.com

Alexandra Padilla

Escuela Politécnica Nacional


Chemical engineering projects assistant

e-mail: alexandra.padilla@est.epn.edu.ec

Tel: 593-983521530

JCT – your trustful partner in China!

Figura AX.6. Cotización del reactor de Polimerización



COTIZACIÓN No. 2013-41577-EPN

Quito, 30 de octubre de 2013

Señores:
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 Presente.

Atención: Ing. Alexandra Padilla
 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 cerrado en acero inoxidable con tapa superior Torisférica de 3mm diámetro 800 mm paredes laterales de 1,20 m base inferior cónica de alto 1,20 cm y cuatro patas de 2"	2675,00	2.675,00
	Nota no se considera ninguna válvula		
1	Tanque cerrado construido en acero inoxidable 304 con paredes de 2mm y casquetes superior e inferior de 3mm tipo torisférico. Y 4 patas con tubo de inox de 2"	2900,00	2.900,00
		Sub Total	5.575,00
		I.V.A.	669,00
		Total	6.244,00

Nota: Requerimos de su orden de compra

Forma de pago: 80% anticipo 40% contra entrega

Tiempo de entrega: seis semanas

Lugar de entrega: QUITO

Validez de la oferta: 80 días

Ing. Fausto Pazmiffo V.
 Presidente

**MANTENIMIENTO INDUSTRIAL Y CALIBRACIÓN
 DE INSTRUMENTOS**

Dirección:
 Av. Ulpiano Beserra N4-121
 Calderón - Ecuador
 Teléfono: 593-01-6035740 /
 2821585
 sematech.ec@gmail.com
 www.sematech.ec

Figura AX.7. Cotización de los silos y tanque de almacenamiento



Wenzhou Guoshun Fluid Equipment Co., Ltd
温州国顺流体设备有限公司



Name	Single layer mixing tank top two covers
Capacity	4500 L
Material	Stainless steel SUS 316
Inner tank	Φ 1700 mm x 2000 mm Wall thickness: 4mm
Motor	5.5 KW
Shape	Vertical type, Cone bottom, cylinder-body, top two covers
Details	1. Inlet, outlet and spare nozzle (Φ51mm/by your requirements). 2. Four supporting feet.(300mm) 3. Glass tube level gauge with stainless steel sleeve.
Unit Price	USD 6300.00
Note	1. It is FOB Ningbo Port. 2. The expiry date of this quote is 60 days. 3. Delivery time: 20 days 4. Plywood case package.

Best wishes,

Wenzhou Guoshun Fluid Equipment Co., Ltd.
ADD: NO.688 Mingzhu Road Wenzhou
Contact: Eric Tsai
Mobile Phone: 0086-15888729727
Fax: 0086-577-86999209
Web: <http://www.wzgs.com/en/>
Email: xiang@wzgs.com

Figura AX.8. Cotización del tanque agitado 1



Wenzhou Guoshun Fluid Equipment Co., Ltd
温州国顺流体设备有限公司



Name	Single layer mixing tank top two covers
Capacity	7000 L
Material	Stainless steel SUS 316
Inner tank	Φ 2000 mm x 2200 mm Wall thickness: 4mm
Motor	11 KW
Shape	Vertical type, Cone bottom, cylinder-body, top two covers
Details	1. Inlet, outlet and spare nozzle (Φ51mm/by your requirements). 2. Four supporting feet.(300mm) 3. Glass tube level gauge with stainless steel sleeve.
Unit Price	USD 9553.00
Note	1. It is FOB Ningbo Port. 2. The expiry date of this quote is 60 days. 3. Delivery time: 20 days 4. Plywood case package.

Best wishes,

Wenzhou Guoshun Fluid Equipment Co., Ltd.
ADD: NO.688 Mingzhu Road Wenzhou
Contact: Eric Tai
Mobile Phone: 0086-15888729727
Fax: 0086-577-86999209
Web: <http://www.wzgs.com/en/>
Email: xiang@wzgs.com

Figura AX.9. Cotización del tanque agitado 2



Wenzhou Guoshun Fluid Equipment Co., Ltd
温州国顺流体设备有限公司



Name	Single layer mixing tank top two covers
Capacity	2000 L
Material	Stainless steel SUS 316
Inner tank	Φ 1500 mm x 1700 mm Wall thickness: 4mm
Motor	5 KW
Shape	Vertical type, Cone bottom, cylinder-body, top two covers
Details	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inlet, outlet and spare nozzle (Φ51mm/by your requirements). 2. Four supporting feet.(300mm) 3. Glass tube level gauge with stainless steel sleeve.
Unit Price	USD 6000.00
Note	<ol style="list-style-type: none"> 1. It is FOB Ningbo Port. 2. The expiry date of this quote is 60 days. 3. Delivery time: 20 days 4. Plywood case package.

Best wishes,

Wenzhou Guoshun Fluid Equipment Co., Ltd.
ADD: NO.688 Mingzhu Road Wenzhou
Contact: Eric Tsai
Mobile Phone: 0086-15888729727
Fax: 0086-577-86999209
Web: <http://www.wzqsh.com/en/>
Email: xiang@wzqsh.com

Figura AX.10.Cotización del tanque agitado 3

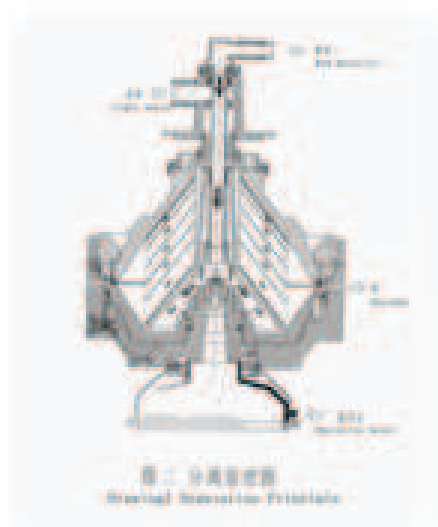


Liaoyang ~~Tianxing~~ Pharmaceutical Machinery Factory

DHN360 disk centrifuge

Structure and Working principle

Type	price(USD)	Comment
DHN360 disk centrifuge	27800	The price includes the electric cabinet(PLC), a set of tool and spare parts



Parameter

Model: DHN360 disk centrifuge
 I.D. of drum: 360 mm
 Speed of drum: ~ 6300 rpm
 G-force: ~9000g
 Equivalent settling area: 26.67x10⁷ cm²
 Capacity: about 1000-3000 L/H (Real capacity depends on the property of the material, for example viscosity, density, solid content etc)
 Distance between disks: 0.6mm
 Motor type and power: Y132M-4-B5 7.5KW
 Outline dimension(L×W×H): 1495x1130x1485mm
 Weight: ~1000Kg

The separator mainly consists of inlet/outlet device, drum, cover, vertical shaft,

Tel: 86-419-3304408 Fax: 86-419-3300080 Website: www.tianxing.com

Figura AX.11. Cotización de la centrífuga

Dongguan Yuanyao Electronics Technology Co., Ltd.

Add: No.61 Xiabian Street, Chang'an Town, Dongguan City, GD 523876, P.R.China
 Tel: +86-769-86245189 ext.811 Fax: +86-769-86245990
 Contact: William Cho Mail to: sales02@my-pt.com.cn Mobile & 24 hr hotline: +86-13798917915
 Excellent service, CE certified, Quality guarantee

QUOTATION

Attn: Mr. Alexandra Padilla Invoice no.: YYQ-131031CQ202
 Company: EPN Date of issue: 2013-10-31
 TEL: Shipment terms: FOB SHENZHEN, CHINA
 FAX: Payment terms: 60% to be paid in advance as down payment
 Add: Ecuador 40% to be paid as balance payment before goods ex-wor
 E-mail: alexandra.padilla@est.opn.edu.ec Delivery: 20 working days after receipt of T/T down payment

Model No.	Description	Quantity	Unit price	Total	Remarks
		SET	USD/SET	USD	
YPO-600	808L High temperature precision drying oven *Max. working temperature 200℃	1	2,800	2,800	For more details pls refer to the attached technical spec. sheet
SAY TOTAL U.S.DOLLARS TWENTY-EIGHT THOUSAND ONLY.					

***Our bank details:**
 BENEFICIARY: DONGGUAN YUANYAO ELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD.
 NAME OF BANK: DONGGUAN RURAL COMMERCIAL BANK
 BANK ADDRESS: NO 2, NANCHENG ROAD, DONGGUAN CITY, GUANGDONG, CHINA
 ACCOUNT NO: 009120392020010166 (USD)
 SWIFT BLC: DGCCCN22

Remarks:

1. Equipped with water tank for automatic humidifying system.
2. Warranty: Free parts warranty service for 12 months.
 During the warranty period, we will provide free parts maintenance service.
 Over the warranty period, lifelong maintenance also available with charges.

For and on behalf of: Yuanyao Electronics Technology Co., Ltd.
Prepared by: William Cho
2013-10-31

T: 0086-769-86245189 ext.811 | F: 0086-769-86245990 | M: 0086-13798917915
 Email: sales02@my-pt.com.cn | MSN: william_cho@live.cn | Skype: william_cho1986
 Web: www.my-pt.com.cn Showroom on alibaba.com: www.my-pt.en.alibaba.com
 Add: No.61 Xiabian Street, Chang'an Town, Dongguan City, GD 523876, China

Figura AX.12. Cotización del horno secador

ANEXO XI

CÁLCULOS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR

Cálculo de la cantidad de kilogramos de resina producidos mensualmente

Para el cálculo de la cantidad mensual de resina que se produce se consideró el funcionamiento de la planta de lunes a viernes.

$$\frac{2\,000 \text{ kg resina}}{\text{día}} \times 5 \text{ días} \times 4 \text{ semanas} = 40\,000 \frac{\text{kg resina}}{\text{mes}}$$

Cálculo del costo de materia prima por kilogramo

En la Tabla AXI.1 se presenta los precios y las cantidades de la materia prima empleadas para la producción de la resina poliéster.

Tabla AXI.1. Precios de las materias primas

Producto	Cantidad (kg)	Precio unitario (\$)	Precio con IVA (\$)
Pacas PET	500	1,80	1 008,00
Etilenglicol	1 200	2,10	2 822,40
Hidroxido de sodio	208	1,05	244,61
Propilenglicol	600	2,64	1 774,08
Anhidrido maleico	290	2,80	909,44
Estireno	700	2,80	2 195,20
Total			8 953,73

$$\text{Costo por kilogramo} = \frac{\text{Costo materia prima}}{\text{kg producidos}}$$

$$\text{Costo por kilogramo} = \frac{8953,73 \$}{2000 \text{ kg}} = 4,48 \frac{\$}{\text{kg}}$$

Cálculo del costo de mano de obra por kilogramo

En la Tabla AXI. 2 se muestra el salario de los trabajadores: el sueldo básico y todos los beneficios de ley. La planta tendrá 5 obreros que laborarán 8 horas al día por turnos.

Tabla AXI.2. Salario de los trabajadores

Detalles	Valor (\$)
Salario	318
Décimo tercer sueldo	318
Décimo cuarto sueldo	318
Aporte patronal 11,15%	35,46
Total anual	4 877,48
Total mensual	406,46
Operarios	5
TOTAL	2 032,29

$$\frac{2\,032,29\ \$}{\text{mes}} \times \frac{1\ \text{mes}}{40\,000\ \text{kg}} = 0,05\ \frac{\$}{\text{kg}}$$

Cálculo del costo de agua por kilogramo

Para el cálculo del costo de agua se consideró el consumo de la lavadora y el tanque de solubilización.

Consumo mensual de agua

Lavadora

$$\frac{5,57\ \text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{20\ \text{días}}{1\ \text{mes}} = 111,5\ \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

Tanque

$$\frac{2\ \text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{20\ \text{días}}{1\ \text{mes}} = 40\ \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

$$\text{Total} = 151,5\ \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

$$\frac{151,5 \text{ m}^3}{\text{mes}} \times \frac{0,72 \$}{1 \text{ m}^3} = 109,08 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Se cobra un 36,6 % del consumo mensual por alcantarillado

$$\frac{109,08 \$}{\text{mes}} \times 0,366 = 39,92 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Se suma una tarifa de \$2,10 por comercialización

$$109,08 \frac{\$}{\text{mes}} + 39,92 \frac{\$}{\text{mes}} + 2,10 \frac{\$}{\text{mes}} = 151,1 \frac{\$}{\text{mes}}$$

$$151,1 \frac{\$}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{40\,000 \text{ kg}} = 0,004 \frac{\$}{\text{kg}}$$

Cálculo del costo de energía eléctrica por kilogramo

El valor total de la potencia consumida por los equipo se indica en la Tabla 3.31.

El costo de KWh para consumo industrial es de \$0,068.

$$7245 \text{ KWh} \times 0,068 \frac{\$}{\text{mes}} = 492,66 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Se cobra un recargo por zona industrial de \$4,182 por KWmes

$$100 \text{ KWh} \times 4,182 \frac{\$}{\text{KWhmes}} = 418,20 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Se añade un 5% por alumbrado público

$$492,66 \frac{\$}{\text{mes}} \times (0,05) = 24,63 \frac{\$}{\text{mes}}$$

10 % Tasa de recolección de basura

$$492,66 \frac{\$}{\text{mes}} \times (0,1) = 49,27 \frac{\$}{\text{mes}}$$

$$492,66 \frac{\$}{\text{mes}} + 418,20 \frac{\$}{\text{mes}} + 24,63 \frac{\$}{\text{mes}} + 49,27 \frac{\$}{\text{mes}} + 1,414 \frac{\$}{\text{mes}} + 17,52 \frac{\$}{\text{mes}} = 1003,69 \frac{\$}{\text{mes}}$$

$$1003,69 \frac{\$}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{40\,000 \text{ kg}} = 0,03 \frac{\$}{\text{kg}}$$

Cálculo del costo de producción por kilogramo de resina poliéster insaturada.

$$\text{Costo}_{\text{materia prima}} + \text{Costo}_{\text{mano obra}} + \text{Costo}_{\text{agua}} + \text{Costo}_{\text{energía}} = \text{Costo}_{\text{producción}}$$

$$4,48 \frac{\$}{\text{kg}} + 0,05 \frac{\$}{\text{kg}} + 0,004 \frac{\$}{\text{kg}} + 0,03 \frac{\$}{\text{kg}} = 4,56 \frac{\$}{\text{kg}}$$