



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE QUÍMICA  
INGENIERÍA QUÍMICA – INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y DISEÑO DE UN PROCESO PARA PRODUCIR 6,000  
TON/AÑO DE UNA RESINA POLIÉSTER INSATURADA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
GERARDO RAMÍREZ PALMA

TUTOR:  
DR. MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: MBA. Guinea Corres Elisa

Secretario: M. I. Ortíz Ramírez José Antonio

Vocal: I. Q. Monterrubio Chavolla Olga Marta

1<sup>er</sup>. Suplente: M. I. Millan Velasco Ezequiel

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Cruz Gómez Modesto Javier

Edificio E, Facultad de Química, laboratorio 212, Ciudad Universitaria, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

DR. MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ

-----  
**FIRMA**

## **Agradecimientos**

A mis padres y mi hermano porque siempre me han impulsado a lograr lo que me propongo, porque soy todo lo que soy gracias a ellos.

A Luis por ser tan único en mi vida, eres el mejor amigo que siempre he querido tener y que espero jamás perder.

A Carmen por ser mi mejor amiga desde que tengo memoria, las pláticas que tenemos siempre tienen impacto en mí y me ayudan a ser una mejor versión de mí.

A la facultad de Química de la UNAM por su compromiso para que los estudiantes tengamos la mejor preparación.

A CONACYT por el apoyo económico a lo largo de la maestría.

Al doctor Cruz y al equipo de trabajo del laboratorio 212, por sus y enseñanzas que me brindaron siempre que los necesité.

Al Dr. Luis Haime, al Q. Pablo Turatti, M. en C. Juan Manuel Robledo, a la Ing. Cecilia Rodríguez y la Ing. Adriana Ávila por la asesoría que me brindaron en todo momento.

A los miembros del jurado que se han tomado el tiempo para leer esta tesis.

# Índice

1. Introducción.....	6
1.1. Planteamiento y justificación .....	7
1.2. <i>Hipótesis de trabajo</i> .....	7
1.3. <i>Objetivos y alcance</i> .....	8
1.3.1. <i>Objetivo principal</i> .....	8
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	8
2. Marco teórico .....	9
2.1. <i>Polímeros</i> .....	9
2.2. <i>Poliésteres</i> .....	10
2.3. <i>Poliésteres insaturados</i> .....	11
2.3.1. <i>Generalidades</i> .....	11
2.3.2. <i>Materias primas</i> .....	13
2.3.2.1. <i>Ácidos insaturados</i> .....	14
2.3.2.2. <i>Ácidos saturados</i> .....	14
2.3.2.3. <i>Glicoles</i> .....	15
2.3.2.4. <i>Monómero vinílico</i> .....	16
2.3.2.5. <i>Aditivos</i> .....	17
2.3.3. <i>Proceso y estructura</i> .....	19
2.3.4. <i>PET</i> .....	23
2.3.5. <i>Propiedades</i> .....	24
2.3.5.1. <i>Prueba de resistencia a la tensión</i> .....	27
2.3.6. <i>Propiedades mecánicas de las RPI en función de su estructura</i> .....	30
2.3.6.1. <i>Efecto de los ácidos carboxílicos (grado de insaturación y tipo de ácido saturado)</i> .....	31
2.3.6.2. <i>Cantidad de monómero</i> .....	32
2.3.6.3. <i>Tipo de glicol</i> .....	33
2.4. <i>Análisis de mercado</i> .....	34
2.4.1. <i>Situación económica de la industria química y petroquímica</i> .....	34
2.4.2. <i>Situación económica de las resinas poliéster, a nivel nacional e internacional</i> .....	37
2.4.3. <i>Situación del mercado de las materias primas para RPI</i> .....	43
3. Desarrollo del proyecto .....	48
3.1. <i>Metodología de medición de tensión y evaluación de mecánica de resinas comerciales</i> .....	48

3.2. Desarrollo de la formulación de la resina poliéster insaturada con mayor contenido de anhídrido maleico .....	52
3.3. Evaluación mecánica de formulaciones desarrolladas .....	55
3.4. Descripción del proceso para producir 6,000 ton/año de una RPI, con base a la formulación escogida .....	56
3.5. Elaboración del balance de materia del proceso descrito .....	64
3.6. Evaluación económica (VPN, TIR, TR) del proceso .....	66
3.6.1. Determinación del costo de la planta.....	68
3.6.2. Evaluación económica de la formulación.....	71
3.6.3. Evaluación de indicadores de inversión con el método de flujos descontados .....	72
3.6.4. Análisis de riesgo .....	75
Conclusiones.....	77
Bibliografía .....	79
ANEXO 1.....	83
ANEXO 2.....	89
ANEXO 3.....	93
ANEXO 4.....	104

## Índice de figuras

Figura 1. Arreglos estructurales de las RPI; (a) Resina no curada y (b) resina curada. ....	12
Figura 2. Aplicaciones de las RPI.....	13
Figura 3. Estructuras de ácidos insaturados.....	14
Figura 4. Estructuras de ácidos saturados.....	15
Figura 5. Estructuras químicas de algunos glicoles empelados en RPI.....	16
Figura 6. Estructura del estireno.....	17
Figura 7. Estructuras de inhibidores.....	17
Figura 8. Mecanismo de inhibición de la quinona.....	18
Figura 9. MEKP comercial.....	19
Figura 10. Estructura del naftenato de cobalto.....	19
Figura 11. Reacción típica de un poliéster insaturado.....	20
Figura 12. Reacción de glicólisis de PET con MEG.....	23
Figura 13. Principales tipos de esfuerzos.....	25
Figura 14. Equipo de medición para ensayo de tensión.....	27
Figura 15. Curva "esfuerzo vs deformación" de una prueba de tensión.....	28
Figura 16. Respuestas del ensayo de tensión de los materiales.....	29
Figura 17. Valor de la industria química mexicana anual.....	35
Figura 18. Montos anuales de inversión en la industria química mexicana.....	35
Figura 19. Productos de acuerdo a la cadena petroquímica.....	36
Figura 20. Porcentaje del volumen de ventas de la industria química, 2015.....	37
Figura 21. Porcentaje del valor de ventas de la industria química, 2015.....	38
Figura 22. Porcentaje del volumen de producción de resinas termofijas, 2015.....	39
Figura 23. Demanda y oferta de las RPI.....	41
Figura 24. Producción mundial de RPI's.....	42
Figura 25. Mercado europeo de RPI del 2012 a 2022 por tipo de producto.....	43
Figura 26. Mercado europeo de RPI del 2012 a 2022, por destino final.....	43
Figura 27. Producción y consumo nacional de anhídrido ftálico.....	45
Figura 28. Consumo y producción nacional de estireno.....	46
Figura 29. Reciclaje nacional de PET.....	47
Figura 30. Equipo Instron 3345.....	49
Figura 31. Molde de silicón con probetas de resina para prueba de tensión.....	50
Figura 32. Reactor PARR modelo 4562.....	53
Figura 33. Reactor de esterificación.....	54
Figura 34. DFP para zona de reacción.....	59
Figura 35. Diseño típico de reactor Batch para plantas RPI.....	60
Figura 36. DFP para zona de servicios auxiliares.....	61
Figura 37. DFP para la zona de almacenamiento de químicos.....	62
Figura 38. Plano de planta.....	63
Figura 39. Componentes de Inversión total de capital para un proyecto.....	67
Figura 40. Clasificación de estimados de costos.....	69
Figura 41. Actividades para cada etapa del estimado de costos.....	69
Figura 42. Gráfica de efectivo acumulado.....	73
Figura 43. Análisis de sensibilidad.....	74

Figura 44. Clasificación de riesgos RBS.....	75
Figura 45. DTI típico para bombas .....	89
Figura 46. DTI típico para intercambiadores de calor tipo tubos y coraza.....	90
Figura 47. DTI típico para tanques de almacenamiento.....	90
Figura 48. DTI típico para reactores agitados enchaquetados.....	91
Figura 49. DTI típico para recipiente vertical .....	92
Figura 50. DTI típico de horno .....	92

## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de polímeros.....	9
Tabla 2. Polímeros termoestables, aplicaciones y características. ....	10
Tabla 3. Propiedades mecánicas y sus normas.....	26
Tabla 4. Valores típicos de propiedades mecánicas de RPI con y sin fibra de vidrio. ....	29
Tabla 5. Propiedades de resinas a base de propilenglicol/maleato/ftalato.....	30
Tabla 6. Efecto del grado de insaturación sobre la resistencia a la tensión. ....	31
Tabla 7. Efecto del grado de insaturación sobre la resistencia a la flexión. ....	31
Tabla 8. Módulo de elasticidad contra el grado de insaturación.....	32
Tabla 9. Resistencia a la tensión de resinas PG-AM a diferentes concentraciones de estireno.....	32
Tabla 10. Resistencia a la flexión en relación al contenido de estireno a diferentes grados de saturación.....	33
Tabla 11. Efecto del tipo del glicol en las propiedades mecánicas de resinas poliéster .....	33
Tabla 12. Propiedades mecánicas de resinas poliéster con diferentes mezclas de glicoles ....	34
Tabla 13. Producción de la industria petroquímica .....	36
Tabla 14. Producción y consumo de resinas sintéticas a nivel nacional. ....	38
Tabla 15. Comportamiento del comercio de resinas sintéticas entre 2014 y 2015.....	40
Tabla 16. Comportamiento del mercado de resinas poliéster . ....	40
Tabla 17. Comercio exterior de resinas poliéster .....	41
Tabla 18. Variación del INPP con servicios en la industria química, rama de resinas y hules sintéticos .....	44
Tabla 19. Variación del INPP de materias primas con servicios en la industria química, rama de resinas y hules sintéticos.....	44
Tabla 20. Producción y consumo nacional de anhídrido maleico.....	44
Tabla 21. Producción y consumo de etilenglicoles a nivel nacional .....	45
Tabla 22. Consumo y producción de propilenglicoles a nivel nacional.....	46
Tabla 23. Claves y características de resinas comerciales .....	49
Tabla 24. Variación de resistencia a la tensión con el tiempo para RCO1.....	51
Tabla 25. Variación de resistencia a la tensión con el tiempo para RCO2.....	51
Tabla 26. Resultados de ensayo de tensión para las resinas comerciales .....	52
Tabla 27. Composición de resinas poliéster sintetizadas.....	54
Tabla 28. Resultados de ensayo de tensión de resinas sintetizadas .....	55
Tabla 29. Formulación para diseño de planta.....	56
Tabla 30. Lista de equipo para DFP de zona de reacción .....	58
Tabla 31. Lista de equipo, zona de servicios auxiliares .....	60
Tabla 32. Lista de equipo para la zona de almacenamiento de químicos .....	61

Tabla 33. Materia prima necesaria para un lote de RPI.....	64
Tabla 34. Balance de materia para la zona de reacción .....	64
Tabla 35. Requerimientos de enfriamiento y calentamiento, para un lote de resina .....	65
Tabla 36. Resumen de costos de inversión .....	70
Tabla 37. Tabla de costos de materia prima.....	71
Tabla 38. Costo total y unitario de la formulación base .....	71
Tabla 39. Monto de la inversión total de capital.....	72
Tabla 40. Indicadores de inversión para la planta de RPI.....	73
Tabla 41. Especificaciones de reactores .....	83
Tabla 42. Especificaciones de condensadores para reactores .....	85
Tabla 43. Especificaciones para tanques de condensados .....	85
Tabla 44. Especificaciones para bombas .....	86
Tabla 45. Especificaciones de tanques de almacenamiento.....	87
Tabla 46. Especificaciones para caldera y horno.....	87

## Abreviaciones

ACCE	Aspen Capital Cost Estimator
AcF	Ácido fumárico
AF	Anhídrido ftálico
AIF	Ácido iso-ftálico
AM	Anhídrido maleico
ANIQ	Asociación Nacional de la Industria Química
ASTM	Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials)
BHET	Tereftalato de bis – 2 – hidroxietileno
BPA	Bisfenol A
COV	Compuestos orgánicos volátiles
CT	Capital de trabajo
DCPD	Diciclopentadieno
DEG	Dietilenglicol
DFP	Diagrama de flujo de proceso
DTI	Diagrama de tubería e instrumentación
EST	Estireno
HQN	Hidroquinona
IFC	Inversión fija de capital
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INPP	Índice Nacional de Precios al Productor
IPC	Ingeniería procura y construcción
ITC	Inversión total de capital
MEG	Monoetilenglicol
MEKP	Peróxido de metiletilcetona
MPG	Monopropilenglicol

MXN	Moneda nacional mexicana
OCo	Octoato de cobalto
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PETG	PET glicolizado
PETr	PET reciclado
PIB	Producto interno bruto
RPI	Resina poliéster insaturada
SNV	Sólidos no volátiles
TIR	Tasa interna de retorno
TPA	Ácido tere-ftálico
UPR	Unsaturated polyester resin
VPN	Valor presente neto

# 1. Introducción.

Las resinas poliéster insaturadas, RPI, son soluciones de poliésteres insaturados, disueltas en un monómero vinílico (Brydson, 1999). Las RPI son los compuestos más usados en materiales reforzados con fibra de vidrio, principalmente en las áreas de construcción, moldeo, marina, transporte y electrónicos (Stevens, 1999).

El poliéster insaturado que conforma a la resina, se sintetiza a partir de una reacción de esterificación entre polioles y di-ácidos carboxílicos, saturados e insaturados. Una vez sintetizado el poliéster, éste se mezcla con el monómero vinílico, inhibidores y aditivos. Posteriormente, a esta solución se le adiciona catalizador que provoca un entrecruzamiento entre el monómero y el poliéster, dando lugar a un polímero termofijo (Brydson, 1999).

De acuerdo a datos de la ANIQ, en el 2015 el mercado de resinas poliéster insaturadas, como muy pocos materiales de la industria química, duplicó su consumo hasta más de 74 mil toneladas y la producción nacional alcanzó casi 60 mil toneladas. Sin embargo, en ese mismo periodo, la importación de estos materiales aumentó y la exportación disminuyó. A nivel mundial el mercado de las RPI ha experimentado el mismo comportamiento al alza, resultando atractivo para empresas norteamericanas reubicar la producción en territorio mexicano (IHS Markit, 2016).

Estos materiales tienen una amplia gama de aplicaciones; en construcción como concreto polimérico; en electrónicos como componentes conductores; en marina como material de recubrimiento y armazón de botes; como material ornamental, entre muchas otras. El incremento en el mercado de estos materiales se debe directamente a un mayor consumo de RPI por parte del sector de la construcción.

Desde la década de los 80, se han sintetizado resinas poliéster insaturadas, a partir de PET de desecho; para lograr esta síntesis es necesario depolimerizar el PET mediante una reacción con algún glicol, a este proceso se le conoce como glicólisis. La glicólisis puede llevarse a cabo ya sea con PET botella o textil y usando mezcla de glicoles o con un solo tipo de glicol.

En México el consumo de PET botella ha aumentado; de acuerdo a cifras del ECOCE, en el 2015 se consumieron 722 mil toneladas de este material, de esta cantidad en el país tan solo se reciclaron 218 mil toneladas. El uso de botellas PET en resinas poliéster ayuda principalmente a disminuir el costo de materia prima sin afectar a propiedades de interés para las industrias de construcción y transporte.

Otro factor de diferenciación de las resinas poliéster insaturadas, es su desempeño mecánico; para el sector de la construcción es muy importante que las resinas tengan altas propiedades de tensión, flexión y/o compresión. Si se logra obtener mejores propiedades mecánicas, entonces la aplicación de las resinas puede ser más especializada y por tanto tener mejores ganancias para las industrias que producen RPI.

El reto es cubrir una parte de la necesidad creciente de resinas poliéster, enfocadas al sector de la construcción con la ventaja de reciclar el PET botella de post-consumo.

### *1.1. Planteamiento y justificación*

Para satisfacer la creciente demanda nacional de las resinas poliéster insaturadas, y aumentar el reciclaje de PET botella, se propone hacer el diseño de una planta productora de RPI, que utilice PET post-consumo en su formulación.

Las formulaciones convencionales de resinas para la construcción se ven limitadas en propiedades de tensión y flexión, como resultado, los consumidores compran otros productos de mayor precio disminuyendo la ganancia final.

Por esta razón, se buscó que las resinas de este trabajo tuvieran mejores desempeños mecánicos, específicamente una mayor resistencia a la tensión. Al mejorar la resistencia a la tensión, el producto puede usarse en diseños de mayor calidad; con la ventaja de incluir un material de bajo valor como el PET en uno de mayor valor agregado.

### *1.2. Hipótesis de trabajo*

Al realizar una evaluación económica de la planta productora de resinas poliéster insaturadas, se pretende obtener indicadores atractivos de inversión, como son: un tiempo de recuperación menor a 5 años, alto valor presente neto (VPN) mayor a cero y una tasa interna de retorno (TIR) con un valor 1.1 veces de la tasa de descuento supuesta para el VPN.

Se considerará PET de post-consumo en la formulación de la resina poliéster insaturada para alcanzar altos desempeños de tensión; valores mayores a 45 MPa de resistencia a la tensión, módulos de tensión por encima de 1020 MPa y que el material curado soporte más de 1080 N de carga.

Se aumentará el contenido de anhídrido maleico con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de la resina poliéster insaturada.

### *1.3. Objetivos y alcance*

#### *1.3.1. Objetivo principal*

Realizar la evaluación económica de una planta productora de resinas poliéster insaturadas, con una capacidad anual de 6,000 toneladas. Las resinas producidas deberán tener un alto desempeño en propiedades de tensión, superiores a los valores típicos reportados para resinas ortoftálicas y usar PET de reciclaje en su formulación.

#### *1.3.2. Objetivos específicos*

- I. Establecer una metodología para evaluar la resistencia a la tensión de las RPI
- II. Medir la resistencia a la tensión de resinas comerciales para comparar las características de éstas con la de una resina base PET reciclado
- III. Desarrollar la formulación de una RPI, base PET reciclado, que tenga mejor desempeño, en resistencia a la tensión
- IV. Realizar el diseño de la planta productora de resinas en base a la formulación desarrollada
- V. Llevar a cabo la evaluación económica de la planta de resinas
- VI. Obtener indicadores de inversión para el proyecto de una planta de resinas poliéster insaturadas

## 2. Marco teórico

### 2.1. Polímeros

La palabra polímero se forma a partir de las palabras griegas *poly*, que significa muchos y *mer*, partes, y refiere a algo constituido por varias partes. Los polímeros son macromoléculas constituidas por una unidad que se repite a lo largo de la molécula; por lo que suelen tener grandes pesos moleculares.

Los polímeros se sintetizan a partir de compuestos químicos que reciben el nombre de monómeros, si más de un monómero se emplea en la síntesis, entonces el polímero se denomina copolímero, pero si solo se polimeriza una cantidad pequeña de monómero, el compuesto resultante tendrá un peso molecular bajo y se le conocerá como oligómero (Stevens, 1999).

Los polímeros pueden clasificarse de diferentes maneras; de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y de origen, entre otras. La tabla 1 sintetiza las diversas clasificaciones de polímeros y las características que dan lugar a esa clasificación.

**Tabla 1. Clasificación de polímeros.**

<b>Tipo de clasificación, de acuerdo a</b>	<b>Tipo de polímero</b>
Origen	Natural, semi-sintético, sintético
Estructura	Lineal ramificado, entrecruzado
Cadena	Copolímero, homopolímero
Aplicación y propiedades físicas	Elastómeros, plásticos, fibras, membranas
Propiedad mecánica	Rígidos y quebradizos, duros y dúctiles, suaves y flexibles
Mecanismo de polimerización	Adición de cadena, condensación
Respuesta térmica	Termoplástico, termofijo
Cristalinidad	Cristalino, semi-cristalino, amorfo
Polaridad	Polar, no polar
Tacticidad	Isotáctico, sindiotáctico, atáctico

Fuente: Alcocer Márquez, 2015

De acuerdo a la clasificación por respuesta térmica, se divide a los polímeros en termoplásticos y termoestables. Los polímeros termoplásticos son aquellos que no están entrecruzados, se pueden disolver y la mayoría pueden ser fundidos y fluir. Por otro lado, los termoestables, también conocidos como termofijos, son moléculas que, debido al

entrecruzamiento en su estructura, son insolubles, no pueden ser fundidas y tampoco puede fluir (Stevens, 1999).

El comportamiento de los polímeros termoestables se debe a que son compuestos entrecruzados que forman una red tridimensional de enlaces, lo que les impide girar o deslizarse. Estos compuestos generalmente presentan buenas propiedades de rigidez, resistencia y dureza, aunque suelen ser poco dúctiles, con baja resistencia al impacto y alta transición vítrea. El proceso de entrecruzamiento no es reversible, por lo que una vez formado el compuesto, será imposible reusar o reciclar (Askeland, 2004).

La tabla 2 resume los polímeros termoestables más comunes en el mercado de los plásticos y recubrimientos.

**Tabla 2. Polímeros termoestables, aplicaciones y características.**

<b>Polímero</b>	<b>Aplicaciones típicas</b>
Fenólicos	Adhesivos, recubrimientos laminados
Aminas	Adhesivos, utensilios de cocina, moldes eléctricos
Poliéster	Moldes eléctricos, laminados decorativos, matriz en compuestos reforzados con fibra de vidrio, material retardante de flama, etc.
Epóxicos	Adhesivos, moldes eléctricos, matrices para materiales compuestos
Uretanos	Fibras, recubrimientos, espumas, aislamiento
Silicona	Adhesivos, juntas, selladores

Fuente: Askeland, 2004

## 2.2. *Poliésteres*

Los poliésteres son los polímeros con la más amplia y versátil aplicación; en el mercado los podemos encontrar como fibras, plásticos, recubrimientos, láminas de resina, hules y plastificantes. Los principales métodos para sintetizarlos son: la esterificación y la transesterificación (Brydson, 1999).

Existen dos tipos de poliésteres entrecruzados:

- Resinas de poliésteres saturados: en este tipo de resinas, el entrecruzamiento ocurre durante la poliesterificación, debido a que se usan monómeros polifuncionales, por ejemplo, el poli (tereftalato de etileno), PET.
- Resinas de poliéster insaturadas: el entrecruzamiento de estos poliésteres ocurre por la incorporación de reactivos con doble enlace en una polimerización posterior a la reacción de esterificación.

## 2.3. *Poliésteres insaturados*

### 2.3.1. *Generalidades*

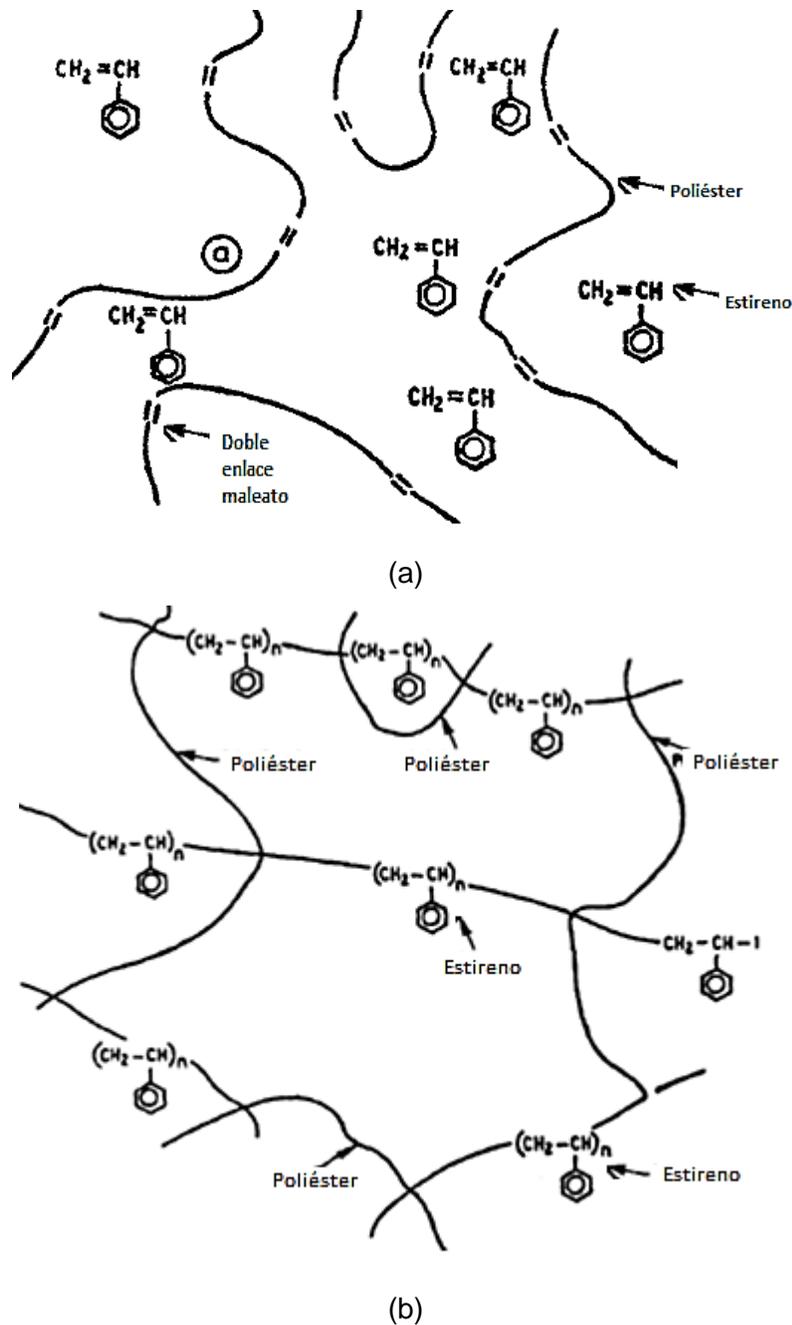
Las resinas de poliéster insaturadas, RPI, son soluciones de poliésteres insaturados, disueltas en un monómero vinílico. Generalmente alcanzan grados de polimerización entre 8 y 10, y como resultado, el peso molecular de estos compuestos puede alcanzar valores de entre 1200 y 3000 (Brydson, 1999).

Las RPI se forman a partir de una reacción de esterificación entre glicoles y ácidos carboxílicos, saturados e insaturados. Los ácidos insaturados proveen a la molécula de espacios reactivos; dobles enlaces carbono-carbono (C=C), los cuales, se entrecruzarán con el monómero vinílico, dando como resultado un polímero termoestable.

Antes de que ocurra el proceso de entrecruzamiento, conocido como curado, la resina debe ser manejable y transportada, ya en las tuberías de la planta o en contenedores para traslado; por ello, en la disolución se agregan inhibidores para prevenir entrecruzamientos indeseados; estos inhibidores son compuestos antioxidantes derivados de la quinona, el más común es la hidroquinona (Brydson, 1999).

Las resinas poliéster insaturadas son los compuestos más usados en materiales reforzados con fibra de vidrio, principalmente en las áreas de construcción, moldeo, marina, transporte y electrónicos (Stevens, 1999).

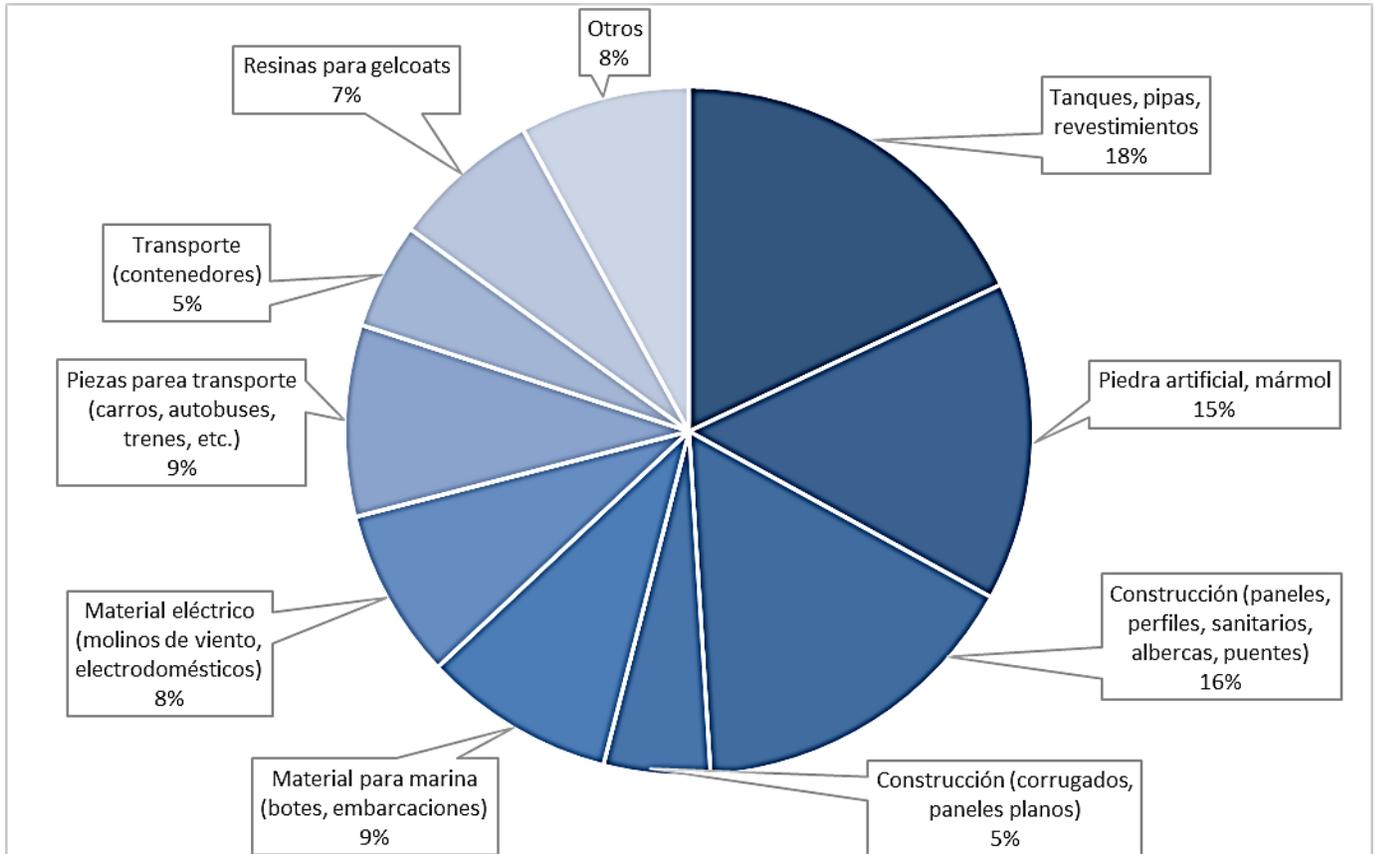
Ya sea como matriz de materiales reforzados o como recubrimientos sin reforzar, las resinas poliéster se emplean entrecruzadas. La figura 1 es una muestra del arreglo tridimensional de una resina sin curar y otra curada (Brydson, 1999).



**Figura 1. Arreglos estructurales de las RPI; (a) Resina no curada y (b) resina curada.**

Dependiendo de la estructura del poliéster y de la cantidad de reactivos, la resina puede tener diferentes propiedades; como consecuencia, estos compuestos tienen diversas aplicaciones en diferentes campos. Las aplicaciones más usuales de las resinas son: paneles para construcción, recubrimientos (*gelcoats*) para albercas o botes marinos, materiales retardantes de flama, como partes plásticas de equipo de transporte, etc.

La figura 2, se muestra las principales aplicaciones de las RPI, publicada por la asociación europea de resinas poliéster/vinil éster (The European UP/VE Resin Association, Fact sheet, 2017).



**Figura 2. Aplicaciones de las RPI**

### 2.3.2. Materias primas

Las materias primas de las RPI usualmente se escogen debido a su costo; sin embargo, en el mercado existen diversos compuestos que, al ser añadidos a las formulaciones convencionales pueden aportar mejoras significativas o cambiar la aplicación del material. La amplia variedad de resinas poliésteres insaturadas se debe a que existen muchos compuestos que pueden servir como materia prima de estos materiales.

La estructura de un poliéster insaturado está compuesta generalmente de tres compuestos básicos: ácidos insaturados, ácidos saturados y glicoles. Una vez formado el poliéster, éste es diluido en un monómero vinílico, que después del entrecruzamiento se integrará a la molécula como se observa en la figura 1.

Además de estos compuestos, las resinas necesitan aditivos, tales como: inhibidores, catalizadores y aceleradores.

### 2.3.2.1. Ácidos insaturados

Son ácidos carboxílicos ó sus anhídridos, que presentan dobles enlaces en su estructura. El compuesto más usado es el anhídrido maleico (AM), éste compuesto tiene un isómero que también se emplea en formulaciones de RPI, el ácido fumárico (ver figura 3).



**Figura 3. Estructuras de ácidos insaturados: (a) Anhídrido maleico, (b) Ácido fumárico.**

Los compuestos de esta naturaleza son los que proveen al poliéster de dobles enlaces reactivos, los cuales reaccionarán con el monómero para formar la red tridimensional. A mayor cantidad de espacios reactivos, mayor serán las fuerzas de interacción en la molécula entrecruzada (Boenig, 1964).

Sin duda, el anhídrido maleico es el más usado en las formulaciones típicas de resinas, ya que al ser anhídrido reaccionará de forma más sencilla. No obstante, se tiene evidencia de que, en muchas formulaciones convencionales, las resinas contienen del 10-30% de insaturaciones tipo maleato y de un 70-90% de insaturaciones tipo fumarato. La causa de este comportamiento es a que a ciertas temperaturas (arriba de 130°C) el anhídrido maleico cambia a su isómero ácido (Boenig, 1964).

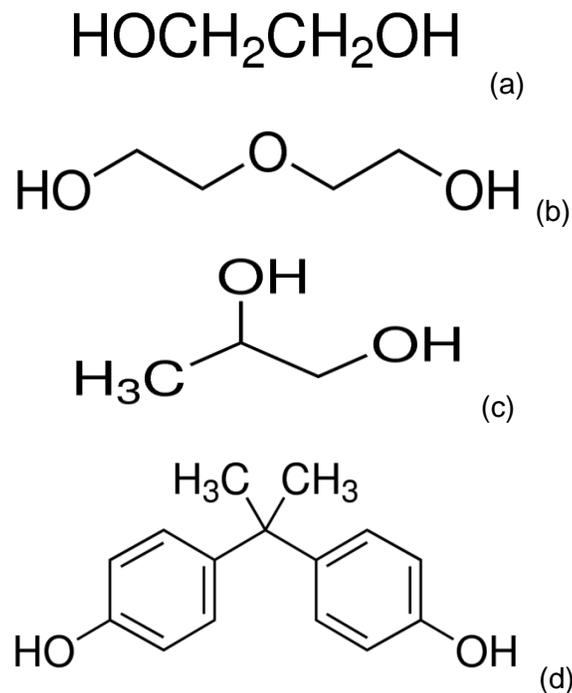
### 2.3.2.2. Ácidos saturados

Existen, principalmente tres ácidos saturados empleados en las resinas: ácido ftálico (o su forma anhídrida (AF)), ácido *iso*-ftálico (AIF) y ácido *tere*-ftálico (TPA). Todos son derivados del xileno y sus isómeros estructurales; *meta*-, *orto*- y *para*-, respectivamente, ver figura 4.



enlaces reactivos. Algunas propiedades como temperatura de distorsión, flexibilidad, o dureza, entre otras, dependen del tipo de glicol que se use en la formulación de las resinas.

Los glicoles más empleados en la industria son: monoetilenglicol (MEG), dietilenglicol (DEG), monopropilenglicol (MPG), bisfenol A (BPA) y otros glicoles de mayor peso molecular. Las estructuras se muestran en la figura 5.



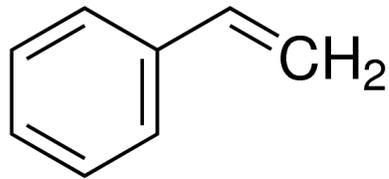
**Figura 5. Estructuras químicas de algunos glicoles empleados en RPI; (a) MEG, (b) DEG, (c) MPG y (d) BPA**

Anteriormente, el glicol más empleado era el monopropilenglicol, debido a su bajo costo, a la mayor compatibilidad con estireno y a las mayores propiedades mecánicas, entre otras razones. Sin embargo, en la actualidad su costo se ha elevado y por esta razón, glicoles como el monoetilenglicol o dietilenglicol lo han sustituido en formulaciones convencionales; el MPG se usa ahora en formulaciones con mayor especialidad, donde el costo de los materiales se recupera en el precio de venta de la resina.

#### 2.3.2.4. Monómero vinílico

El monómero vinílico tiene dos funciones muy importantes en la resina poliéster; primero, baja la viscosidad del poliéster al ser el disolvente de la mezcla; segundo, será el agente de reticulación en el entrecruzamiento de las moléculas, como se observó en la figura 1.

El monómero más usado, debido a su bajo costo, baja viscosidad y facilidad de uso, es el estireno, este material se obtiene de la deshidrogenación catalítica del etilbenceno. Su estructura química se muestra en la figura 6.



**Figura 6. Estructura del estireno.**

Existen otros monómeros vinílicos en el mercado, como: metacrilato de metilo, vinil-tolueno, acetato de vinilo, acrilamida, ftalato de dialilo y fumarato de dialilo, entre muchos otros; sin embargo, muchos de estos compuestos no son totalmente compatibles con los poliésteres, por lo que se necesitaría la adición de algún aditivo que promueva la mezcla.

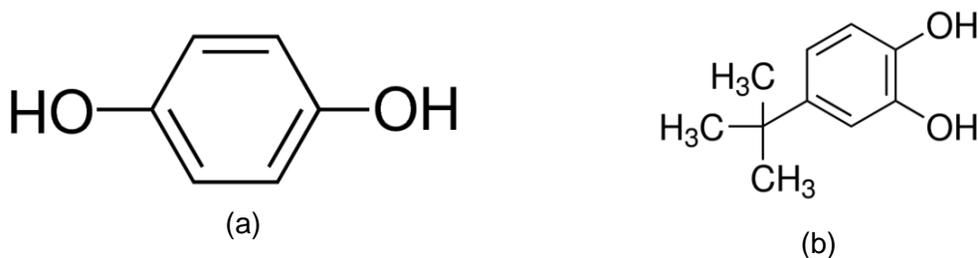
#### 2.3.2.5. Aditivos

En esta clasificación solo se incluyen los compuestos que sirven para acelerar, iniciar o inhibir reacciones.

##### *Inhibidores*

Al final del proceso de producción, el cual se discutirá más adelante, se deben agregar agentes de inhibición. Estos compuestos suelen ser antioxidantes derivados de la quinona. Tienen la función de inhibir un entrecruzamiento no deseado de la resina; el curado es una reacción que se inicia por radicales libres y que una vez iniciada no puede frenarse.

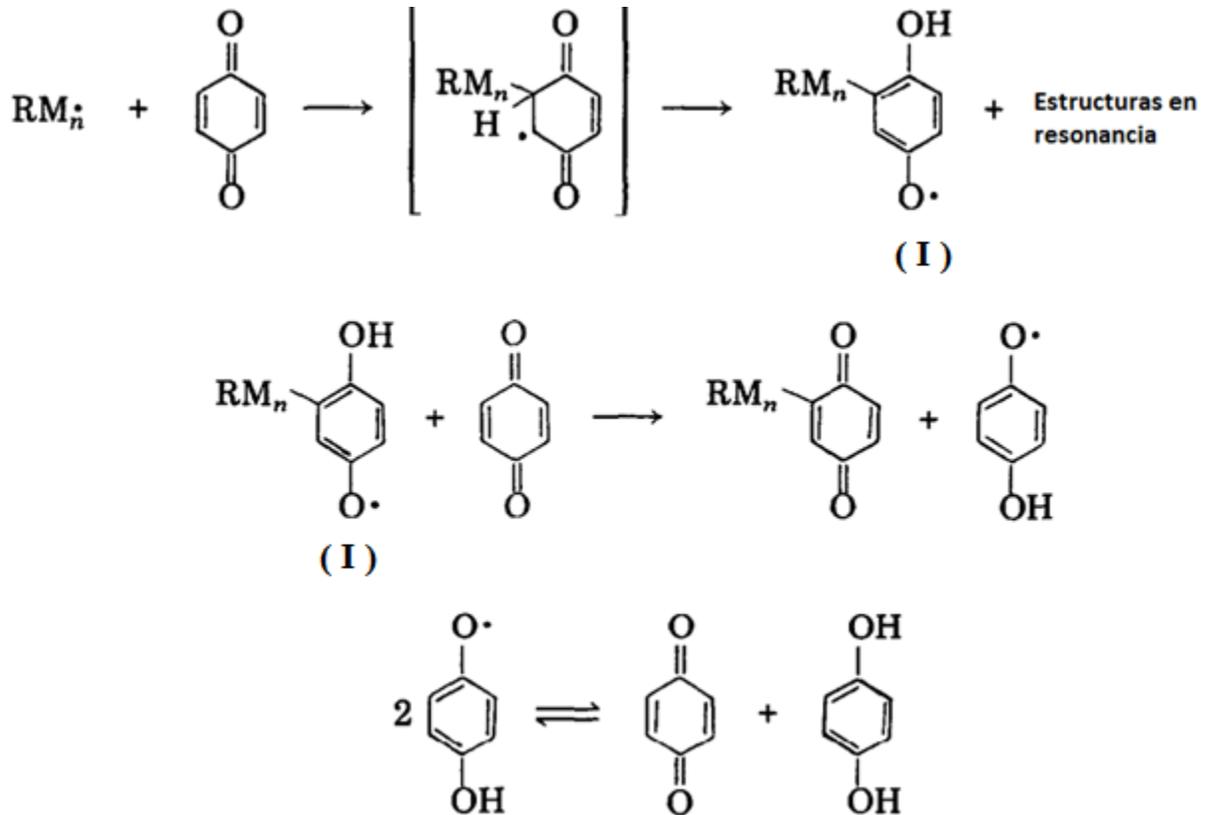
Los inhibidores más usados en formulaciones convencionales son la hidroquinona y el p-tert-butilcatecol, ver figura 7.



**Figura 7. Estructuras de inhibidores; (a) Hidroquinona y (b) p-tert-butilcatecol**

Los procesos de inhibición para resinas poliéster están muy bien estudiados por diferentes autores: Matynia; et al., 1998; Novak, 1988, Parker E. E., 1963; Ramis, 1995.

La figura 8 ejemplifica el sistema de inhibición de la quinona, que es muy parecido al de la hidroquinona. En la figura 8, se puede apreciar como un radical libre (donde R puede ser la cadena del poliéster o el estireno), ataca a la molécula de la quinona y ésta se convierte en un radical de quinona (I). Cuando el radical se encuentra con otra molécula de quinona libre, el radical inicial se estabiliza y forma otro radical de quinona. Este último se puede estabilizar de nuevo a quinona e hidroquinona que servirán de inhibidores en cualquier momento que otro radical se libere (Ramis J., 1994).

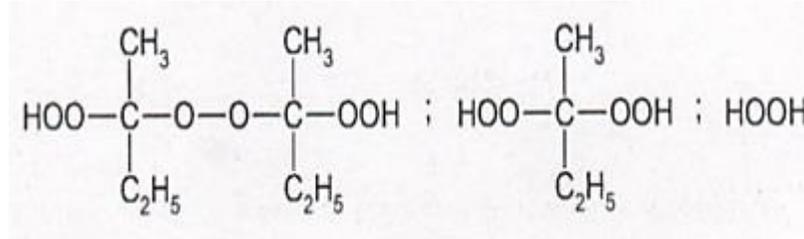


**Figura 8. Mecanismo de inhibición de la quinona**

#### *Catalizador*

Para el curado de la resina se necesita un catalizador de tipo peróxido; estos compuestos al degradarse, forman radicales libres que inician el entrecruzamiento. En este contexto los peróxidos funcionan más bien como iniciadores y no como catalizadores, ya que se llegan a consumir durante el curado, pero en el comercio, tanto productores como usuarios les conocen como catalizadores (Ramis J., 1994).

El peróxido de metil-etilcetona (MEKP, por sus siglas en inglés) es el catalizador más usado en resinas poliéster; éste se comercializa diluido en diferentes compuestos, como el ftalato de metilo, ver figura 9. También, existen otros catalizadores como peróxido de ciclohexanona, algunos hidroperóxidos y peróxido de benzoilo (Ramis J., 1994).



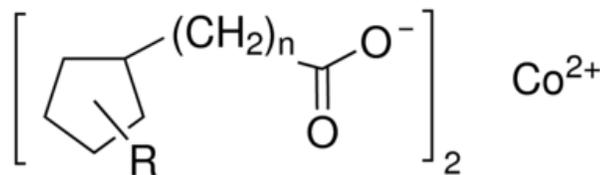
**Figura 9. MEKP comercial**

La cantidad de catalizador para el entrecruzamiento de la resina suele ser entre 1 y 2% en peso respecto a la resina.

#### *Acelerador*

El acelerador o promotor es usado para acelerar la degradación del peróxido en radicales libres y provocar un curado más rápido. El tiempo de gelado y curado se pueden modificar de acuerdo a la aplicación, y dependerán de la concentración del acelerador, típicamente entre 0.5 y 1% en peso (Boenig, 1964).

El acelerador debe ser compatible con el catalizador, ya que no todos los peróxidos son acelerados de la misma manera. Para el MEKP, existen dos compuestos muy conocidos en el mercado, naftenato de cobalto y el octoato de cobalto. Los compuestos de cobalto se han preferido en comparación a otros, como vanadio o algunas aminas, ver figura 10 (Brydson, 1999).

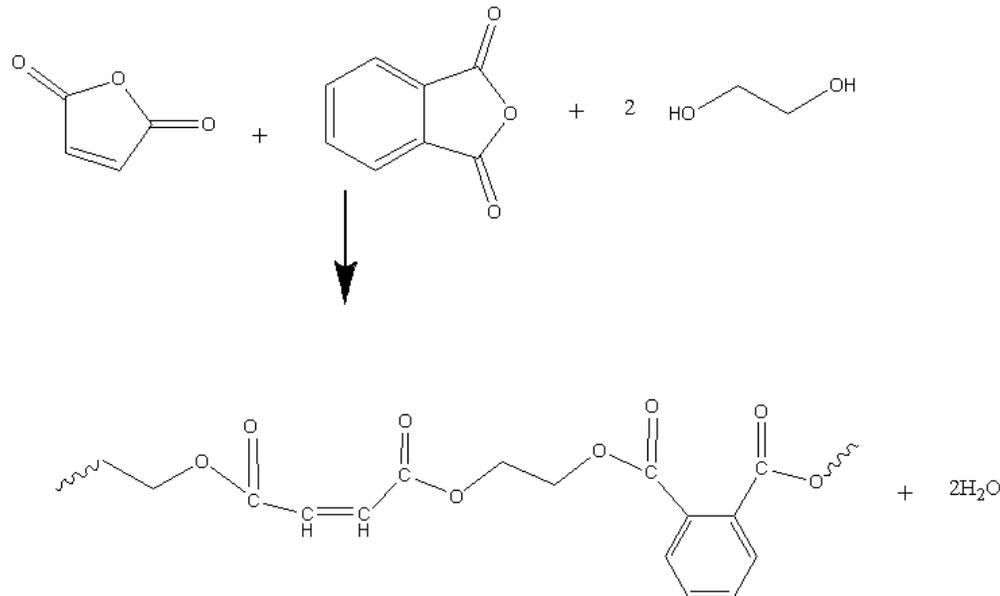


**Figura 10. Estructura del naftenato de cobalto.**

Usualmente las resinas se venden pre aceleradas, es decir, a la solución de la resina se le agrega el acelerador, para que una vez que el usuario adquiera la resina, éste solo agregue el catalizador en la cantidad deseada y la resina cure en un tiempo específico.

#### 2.3.3. *Proceso y estructura*

Los poliésteres insaturados se fabrican mediante la esterificación de glicoles con ácidos carboxílicos; la reacción libera agua como subproducto y ocurre entre temperaturas de 200°C a 220°C. Un ejemplo de la reacción con anhídrido maleico, anhídrido ftálico y monoetilenglicol, se muestra en la figura 11 (Stevens, 1999).



**Figura 11. Reacción típica de un poliéster insaturado**

Dependiendo de la cantidad de reactivos, se puede hacer que la cadena del polímero crezca; a medida que la cadena crece, también aumentará la viscosidad.

Una manera típica de monitorear el avance de reacción es mediante el volumen de agua que se genera de la reacción y que se recupera en condensadores adaptados a los reactores, pero quizá la forma más efectiva y para mayor control de calidad es la evaluación del número de ácido. De acuerdo a (Malik & Choudhary, 2000), el número ácido se relaciona con el peso molecular del poliéster con la ecuación 1.

$$PM = \frac{56100}{No. \text{ácido}}$$

**Ecuación 1**

Los primeros trabajos registrados sobre poliésteres datan de 1847, sin embargo, fue hasta 1920 con el trabajo de Wallace H. Carothers (“Introduction to the General Theory of Condensation Polymers”) que se produjeron poliésteres con una estructura definida y controlada; es con el trabajo de Carothers que se empezaron a producir polímeros por poli-condensación. Por los años

30 con los trabajos de Bradley, Kropa y Johnston, a la par de Ellis, se conocieron los primeros poliésteres insaturados y algunas de sus propiedades (Boenig, 1964).

De acuerdo a Kaska y Lesek (1991), existen al menos 4 procesos para producir las resinas poliéster insaturadas:

- I. Proceso de fusión: este proceso se realiza a presión atmosférica. En la superficie de la mezcla reactiva se burbujea algún gas inerte para evitar coloraciones indeseadas. La reacción se lleva a cabo en un reactor tipo batch, que puede ser calentado por aceite térmico o vapor, conectado a un condensador que se encarga de eliminar el agua del sistema reactivo. La eliminación del agua es crucial para el avance de la reacción; en esta variante la rapidez de eliminación solo es razonable durante las etapas inicial e intermedia, pues conforme avanza la reacción se vuelve complicado eliminar el agua y esto puede provocar un gelado prematuro
  - a. Proceso con solvente azeotrópico: es una variante del proceso de fusión, en la cual se introduce a la mezcla reactiva, un solvente azeotrópico. El solvente tiene el objetivo de incrementar la eliminación del agua de reacción. El solvente suele ser aromático, como el xileno, ya que es inmisible con agua, puede reincorporarse al reactor fácilmente y también disuelve al anhídrido ftálico, previniendo que éste sublime. El uso del solvente puede ahorrar hasta un 50% de energía, ya que se incrementa la rapidez de reacción. Algunas veces, en lugar de usar un solvente aromático, se usa algún alcohol mono funcional, como ciclohexanol. Esta variante se ve limitada por el nivel de equipamiento de seguridad que se debe emplear dependiendo del solvente
  - b. Proceso con gas inerte: es otra variante del proceso de fusión, pero en lugar de burbujear el gas inerte en la superficie, se burbujea desde el fondo del reactor, promoviendo la volatilidad del vapor de agua, y que ésta se elimine del sistema con mayor rapidez. El aumento en la rapidez de reacción, debido a la eliminación de agua, es comparable con los valores que se alcanzan con el método azeotrópico. La ventaja de este sistema radica en que el nivel de equipamiento y de seguridad instalada no es significativo, en comparación con el método azeotrópico. Sin embargo, una desventaja es en el aumento de volatilidad de compuestos como al anhídrido ftálico
- II. Proceso con vacío: este proceso se utiliza para mezclas con contenido de anhídrido maleico muy elevado (mayor de 50% en mol). Se disminuye la presión hasta 5 kPa,

lo que provoca una disminución en la temperatura de ebullición del agua. Al igual que el proceso con gas inerte, esta metodología se aplica casi al final de la reacción, ya que la rapidez con que se elimina el agua del sistema disminuye al avanzar la reacción

En muchas ocasiones, para volver más versátil la planta de producción, se instalan equipos que son capaces de combinar estos procesos (Kaska & Leseck, 1991).

El proceso de producción más común lo describe Ramis (1994):

1) Se cargan sucesivamente los ácidos o anhídridos y los glicoles y se introduce gas inerte, haciéndolo burbujear desde el fondo y se agrega a la solución un inhibidor, como la hidroquinona, para evitar polimerizaciones prematuras. Con un calentamiento suave, los ácidos funden rápidamente en el glicol

2) Se mantiene un calentamiento lento durante 3 o 4 horas, elevándose gradualmente la temperatura de la mezcla. Durante este periodo se realiza un control del número de ácido y de la viscosidad. Se libera agua, que se elimina por el condensador

3) La mezcla se mantiene a 210 °C hasta que su número de ácido es inferior a 50 o alcanza un valor determinado y la viscosidad se encuentra entre los valores límite, previamente seleccionados. Se determina el tiempo de gelificación

4) Si se encuentra dentro de las especificaciones deseadas, la mezcla se enfría hasta 100 °C y se transfiere al mezclador. Se añade el monómero (normalmente estireno), a fin de obtener la viscosidad deseada y proporcionar otras propiedades para la manipulación y la aplicación final. Es interesante recordar que el monómero adicionado a la resina, además de proporcionar la viscosidad óptima para una posterior manipulación, llega a formar parte de la estructura de la resina curada durante la polimerización o entrecruzamiento. Si el inhibidor se agota durante el proceso reactivo, debe añadirse una cantidad adicional para el almacenamiento de la resina. Si la resina se almacena fría, puede mantenerse estable durante meses e incluso años (Ramis J., 1994)

#### 2.3.4. PET

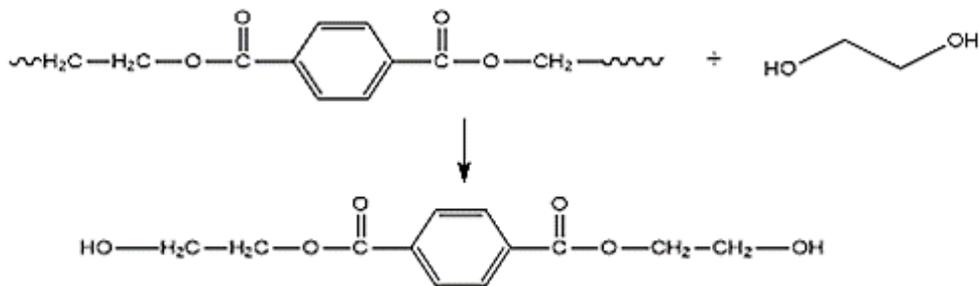
El poli (tereftalato de etileno) es un polímero termoplástico de poliéster y es uno de los plásticos más producidos a nivel mundial. Sus aplicaciones incluyen botellas de plástico, fibras, películas fotográficas, etc.

Actualmente, en el mundo existe la preocupación sobre la creciente cantidad de botellas de PET que son dispuestas como material de desecho. Aunado a esta problemática, México es el primer país a nivel mundial en consumo de botellas de PET; de acuerdo a los datos del 2006 de la procuraduría del consumidor (PROFECO), para ese año la demanda de botellas de PET era de 670 mil toneladas y de acuerdo al mismo estudio un mexicano consumía 6.5 kg de PET anualmente, aproximadamente 195 botellas de este plástico (PROFECO, 2006)

Frente a este panorama, se han empleado técnicas de reciclaje, tanto mecánico como químico. Como lo estudia Alcocer Márquez, en su trabajo titulado *Estudio y valoración del reciclaje químico del poli-(tereftalato de etileno), PET*; estos procesos ayudan no solo a disminuir el volumen de basura, sino que también contribuyen a la reincorporación de material petroquímico

Uno de los métodos más usuales para el reciclaje químico del PET es la depolimerización con glicol o glicólisis. Este método consiste en hacer reaccionar el PET de desecho, ya sea de botella o textil, con algún glicol en exceso; los glicoles más usados son el dietilenglicol y el monoetilenglicol.

La reacción con PET y monoetilenglicol (MEG) en exceso, en presencia de un catalizador, da como resultado el compuesto conocido como tereftalato de 2-bis(hidroxi-etileno), BHET por sus siglas en inglés. La reacción se muestra en la figura 12 (Alcocer Márquez, 2017).



**Figura 12. Reacción de glicólisis de PET con MEG**

Dependiendo de la cantidad de glicol, del tipo de glicol o incluso del catalizador, el producto de la glicólisis del PET puede llegar a ser una mezcla de diversos oligómeros del PET

con diferentes pesos moleculares, pero el compuesto en mayor proporción será el BHET (Duque-Ingunza; et al., 2013).

Las aplicaciones del BHET se han estudiado por diversos autores, en especial en formulaciones de resinas poliéster: Puangsansuk, Utpal, Tahvildari, Duque-Ingunza y Karayannidis, Aslan y Abdel-Azim. Las resinas que se han preparado con anhídrido maleico, anhídrido ftálico, BHET y en ocasiones junto con otro glicol (PG, MEG o DEG).

En principio el BHET reacciona como un glicol y esterifica a los anhídridos presentes; la ventaja de usar este compuesto en la resina, es que introduce un anillo *tere*-ftálico a la molécula del poliéster sin la complejidad del proceso con TPA “virgen” (Tahvildari, Mozafari, & Tarinsun, 2010). Además, algunos autores como Aslan y Abdel-Azim, reportan que el uso de PET glicolizado puede contribuir a reducir el costo de una resina poliéster insaturada. En la bibliografía se reporta que las propiedades de las resinas preparadas con PET glicolizado no suelen ser muy diferentes de las propiedades convencionales de una resina orto-ftálica: Vaidya y Nadkarni, 1988; Abdel-Azim A., 1996; Aslan; et al., 1997; Karayannidis; et al., 2005; Potiyara; et al., 2007; Puangsansuk; et al., 2009; Tahvildari; et al., 2010; Duque-Ingunza; et al., 2013.

### 2.3.5. *Propiedades*

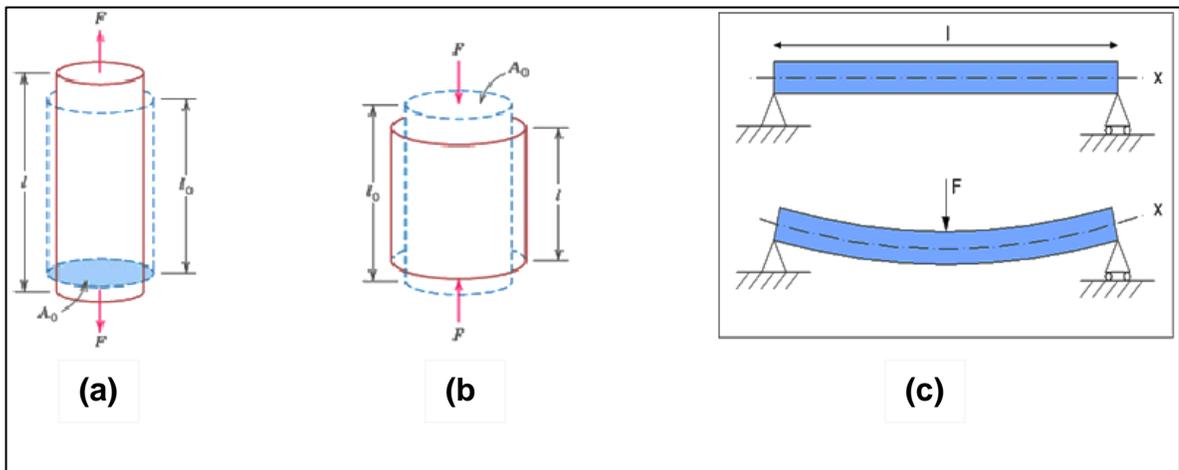
Como ya se ha mencionado anteriormente, las resinas poliéster insaturadas poseen diferentes propiedades que son de interés para diferentes campos de aplicación; estas aplicaciones pueden variar significativamente al cambiar la formulación de la resina, sin tener que modificar el equipo del proceso.

Dependiendo de la aplicación, cualquier material puede ser sometido, al mismo tiempo, al menos a un tipo esfuerzo. El esfuerzo ( $\sigma$ ) es el cociente entre una fuerza aplicada (F) sobre un área de trabajo (A). Se conocen cinco tipos de esfuerzos que dependen de la dirección en que es aplicada la fuerza, respecto a un eje de referencia o apoyo:

- Esfuerzo por tensión
- Esfuerzo por compresión
- Esfuerzo por flexión
- Esfuerzo por torsión
- Esfuerzo cortante

Una vez entrecruzadas, las resinas poliéster insaturadas están sometidas, principalmente, a los siguientes esfuerzos:

- Esfuerzo por tensión. Es un tipo de esfuerzo que sucede solo en un eje (uniaxial) y se presenta cuando una fuerza normal se aplica en sentido contrario a otra (Figura 13a)
- Esfuerzo por compresión. Es un esfuerzo uniaxial en donde una fuerza normal es aplicada en el mismo sentido que la fuerza de apoyo (Figura 13b)
- Esfuerzo por flexión. Este tipo de esfuerzo sucede cuando se ejerce una fuerza sobre un cuerpo que se apoya en dos puntos extremos; este esfuerzo no es uniaxial, ya que al mismo tiempo se ejerce una fuerza en la parte media y ocurre el fenómeno de cizallamiento en los extremos del cuerpo (Figura 14c)



**Figura 13. Principales tipos de esfuerzos: (a) Tensión, (b) Compresión, (c) Flexión. Fuente (Askeland, 2004)**

Cuando se ejerce cualquier tipo de esfuerzo sobre un cuerpo, éste sufrirá al menos un cambio en sus dimensiones el cual se denomina “deformación” ( $\epsilon$ ). Debido a que es una medición que se refiere a un momento inicial y final, la deformación típica reportada es la longitudinal; ésta puede expresarse en unidades de milímetros o como una deformación porcentual.

La caracterización de los materiales mediante sus propiedades mecánicas está normado por la Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés), que se encarga de regular los estándares de normatividad que se utilizan en todo el mundo para mejorar la calidad del producto (tabla 3).

**Tabla 3. Propiedades mecánicas y sus normas**

Propiedad	Número de norma ASTM	Nombre de la norma (en inglés).
Tensión	ASTM-D0638	Métodos de medición para las propiedades de tensión de plásticos (Test Method for Tensile Properties of Plastics)
Flexión	ASTM-D0790	Métodos de medición para las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y para materiales de aislamiento eléctrico (Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials)
Compresión	ASTM-D0695	Método de medición para las propiedades de compresión de plásticos rígidos (Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics)
Dureza tipo Barcol	ASTM-D2583-95R01E01	Método de medición para dureza de plásticos rígidos por hendidura, por medio de durómetro tipo Barcol (Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor)
Impacto tipo Izod	ASTM-D-356	Método de medición para la resistencia al impacto de plásticos por medio de péndulo Izod (Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics)

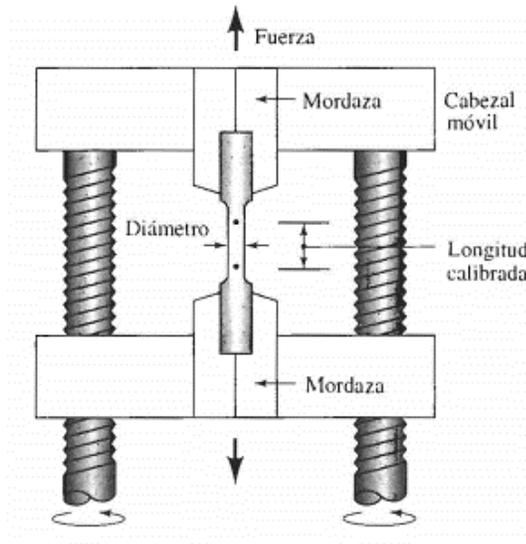
De las pruebas de tensión, flexión y compresión, los valores que se reportan a nivel industrial y comercial son:

- Resistencia a la tensión, flexión o compresión
- Módulo de elasticidad
- Deformación a la ruptura
- Carga máxima

Las normas establecen las condiciones para llevar a cabo las pruebas ( $23 \pm 2$  °C y  $50 \pm 5\%$  de humedad), las dimensiones de las probetas de acuerdo al material y tipo de prueba, velocidad de prueba y las metodologías de cálculo de resultados.

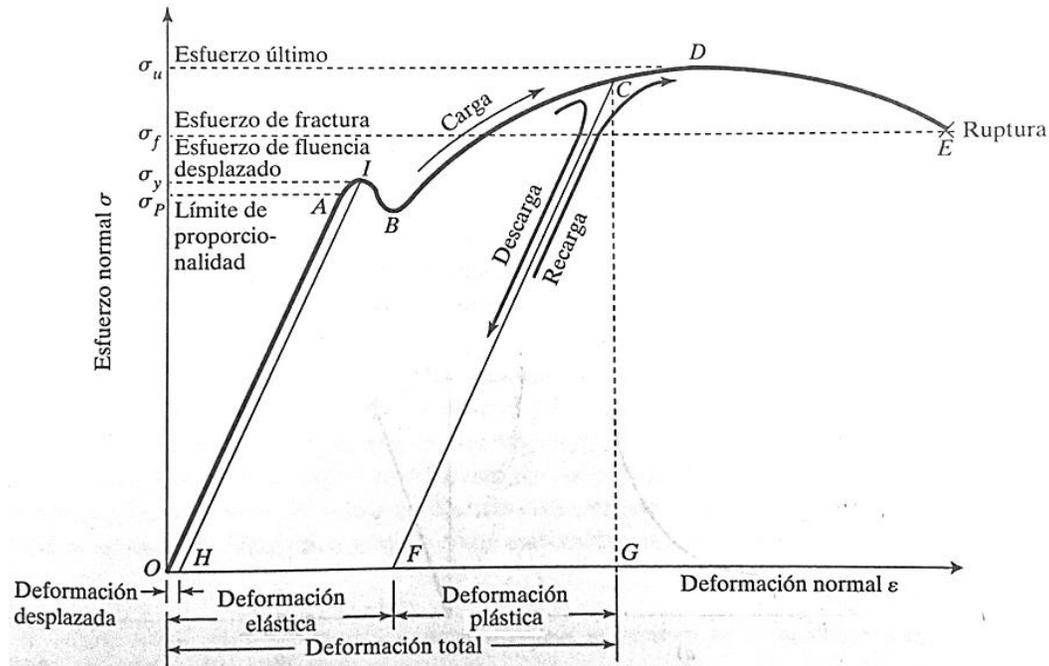
### 2.3.5.1. Prueba de resistencia a la tensión

La prueba de tensión se mide la resistencia que un material sólido opone a una fuerza que actúa en sentido contrario a un eje de referencia. En la figura 14, se muestra un ejemplo del equipo con el que se lleva a cabo la prueba.



**Figura 14. Equipo de medición para ensayo de tensión. Fuente (Askeland, 2004)**

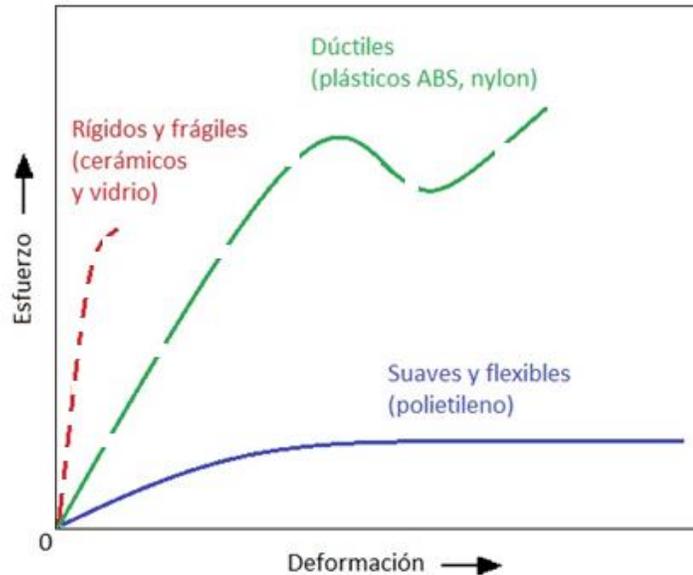
Este tipo de equipos son capaces de medir la carga (fuerza) que se le aplica al material a cada instante, hasta que éste cede, es decir, se fractura. De este tipo de pruebas se obtienen diagramas donde se puede observar el comportamiento del material a lo largo de la muestra, como se ve en la figura 15.



**Figura 15. Curva "esfuerzo vs deformación" de una prueba de tensión. Fuente (Askeland, 2004)**

- Módulo de elasticidad, o módulo de tensión, (límite de proporcionalidad): es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación, que se presenta en la región elástica. Está íntimamente relacionado con la fuerza de enlace de los átomos; una pendiente muy acentuada, significa que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos. También es una medida de la rigidez del material.
- Deformación elástica: es la región de la curva en la que el material se comporta elásticamente, es decir, a pesar de ser deformado, el material puede regresar a su estado inicial
- Deformación plástica: Es la región de la curva en la que la deformación del material ya no se puede revertir, el material seguirá deformándose hasta que se fracture
- Esfuerzo de fluencia: es el punto límite del comportamiento elástico, una vez superado este punto el material entra a la región plástica.
- Carga máxima o esfuerzo último: es la carga o fuerza máxima que resiste el material, sin fracturarse.
- Resistencia a la tensión: es la carga máxima dividida entre el área donde se lleva a cabo dicha fuerza, es una medida de la carga máxima que resiste un material, con dimensiones conocidas, sin que se fracture dicho material.
- Deformación de ruptura: es la medida porcentual o longitudinal que sufre el material hasta la ruptura.

Las resinas poliéster insaturadas se pueden entrecruzar con o sin cargas (tales como fibra de vidrio o de carbono); una vez entrecruzados, estos materiales no exhiben todos los comportamientos antes descritos, debido a que el entrecruzamiento vuelve rígido al material, por esta razón, las RPI se clasifican como materiales “cerámicos”, éstos materiales no se elongan más del 18% de su longitud original, ver figura 16 (Askeland, 2004).



**Figura 16. Respuestas del ensayo de tensión de los materiales. Fuente: (Askeland, 2004)**

Hansmann (2003) recopiló valores típicos de las propiedades mecánicas de las resinas entrecruzadas, ver tabla 4.

**Tabla 4. Valores típicos de propiedades mecánicas de RPI con y sin fibra de vidrio.**

	Resina	Dureza Barcol	Resistencia a la tensión	Módulo de tensión	Elongación	Resistencia a la flexión	Módulo de Flexión	Resistencia a la compresión
			MPa	GPa	%	MPa	GPa	MPa
Sin fibra de vidrio	Orto-ftálica	-	55	3.45	2.1	80	3.45	-
	Iso-ftálica	40	75	3.38	3.3	130	3.59	120
Con fibra de vidrio	Orto-ftálica	-	150	5.5	1.7	220	6.9	-
	Iso-ftálica	45	190	11.7	2	240	7.6	210

Este autor, como muchos otros, hace notar que las resinas iso-ftálicas tienen mejores comportamientos mecánicos, en comparación las resinas orto-ftálicas; Parker E. E., 1954; Carlston; et al., 1959; Parker E. E., 1966. De la misma manera, se demuestra que, los materiales compuestos con fibra de vidrio y resinas poliéster, aumentan significativamente las propiedades

mecánicas, y por ello, estos materiales compuestos han logrado sustituir a los metales o rocas en algunas aplicaciones de la construcción. Por ejemplo, el óxido de aluminio puro tiene las siguientes propiedades: resistencia a la tensión de 207 MPa, resistencia a la flexión 345 MPa y resistencia a la compresión de 2,590 MPa.

### 2.3.6. Propiedades mecánicas de las RPI en función de su estructura

Las propiedades físicas de las resinas dependen del tipo de compuestos, la proporción en que estén relacionados, la combinación entre diferentes compuestos dentro de la misma clasificación, entre otras. Por esta razón es importante analizar cada grupo por separado para definir las formulaciones que puedan resultar en los mejores desempeños en cuanto a las propiedades mecánicas de interés.

La principal fuente bibliográfica de esta sección es el libro “Unsaturated polyesters: structure and properties”, del autor Herman V. Boenig, 1964, Elsevier Publishing Company. Este libro es citado en muchas referencias actuales, ya que es un estudio completo de la relación entre propiedades en función de la formulación de las resinas poliéster.

A continuación, en la tabla 5, se muestran diversas formulaciones de RPI, así como sus propiedades físicas y químicas.

**Tabla 5. Propiedades de resinas a base de propilenglicol/maleato/ftalato.**

# resina	Relación molar maleato/ftalato	Estireno [%]	Pico Exotérmico [°C]	Resistencia a la flexión [MPa]	Módulo de flexión [MPa]	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de tensión [MPa]	HDT [°C]	Elongación [%]
1	40/60	20	162	143	4,551	57	5,792	64	1.2
2	40/60	30	175	111	4,068	54	5,378	70	1.31
3	40/60	40	176	98	4,068	63	4,688	78	1.73
4	40/60	50	171	108	3,654	66	5,171	80	1.85
5	50/50	20	171	138	4,482	56	5,861	70	1.3
6	50/50	30	193	131	3,999	57	5,861	90	1.32
7	50/50	40	200	122	4,344	63	5,447	94	1.7
8	50/50	50	202	108	3,447	55	4,964	93	1.7
9	60/40	20	180	134	4,482	55	5,998	76	-
10	60/40	30	204	119	4,619	59	5,447	104	1.38
11	60/40	40	208	123	4,137	50	5,309	108	1.46
12	60/40	50	207	122	3,516	46	4,826	107	1.23

En la tabla 5, se muestran dos factores de interés en la formulación para lograr valores más altos en las propiedades mecánicas: la relación molar del maleato con ftalato (o grado de insaturación en la resina) y la cantidad porcentual en peso del estireno.

### 2.3.6.1. Efecto de los ácidos carboxílicos (grado de insaturación y tipo de ácido saturado)

En diversas formulaciones se ha encontrado que a mayor grado de insaturación, es decir, cuando la relación mol de maleato con ftalato se vuelve mayor, las propiedades de tensión y flexión se incrementan. Por ejemplo, en la tabla 5, cuando se aumenta la cantidad de maleato a la misma cantidad de estireno, las mejores propiedades de flexión y tensión también aumentan.

La tendencia a incrementar las propiedades de flexión y tensión respecto al grado de insaturación tiene un límite en donde las propiedades se maximizan, pero una vez superado ese límite, las propiedades decrecen, ver tablas 6 y 7.

**Tabla 6. Efecto del grado de insaturación sobre la resistencia a la tensión.**

Composición del poliéster	Resistencia a la tensión [MPa]					
	Porcentaje de insaturación (mol%)					
	20%	40%	50%	60%	80%	100%
AM-AF-MPG	25.5	58.6	61.4	62.1	55.2	27.6
AcF-AF-MPG	34.5	42.1	53.8	53.1	47.6	27.6
AM-AIF-MPG	35.9	62.1	63.4	63.4	60.0	27.6

AM: anhídrido maleico, AF: anhídrido ftálico, AcF: ácido fumárico, MPG: Monopropilenglicol, AIF: ácido *iso*-ftálico.

**Tabla 7. Efecto del grado de insaturación sobre la resistencia a la flexión.**

Composición de poliéster	Resistencia a la flexión MPa				
	Porcentaje de insaturación (mol%)				
	20%	40%	60%	80%	100%
AM-AF-MPG	41.4	117.2	117.2	103.4	89.6
AM-TPA-PG	-	96.5	117.2	103.4	89.6
AM-AIF-PG	96.5	117.2	117.2	103.4	89.6

AM: anhídrido maleico, AF: anhídrido ftálico, AcF: ácido fumárico, MPG: Monopropilenglicol, AIF: ácido *iso*-ftálico, TPA: ácido *tere*-ftálico, DEG: dietilenglicol.

De acuerdo a Boenig (1964), se ha encontrado que las resinas que contienen compuestos aromáticos exhiben mayores propiedades físicas que sus homólogos lineales. También se ha encontrado que, de alguna manera, los compuestos *iso*-ftálicos aportan mayor resistencia a la tensión y a la flexión que los derivados *orto*-ftálicos.

Otra propiedad física importante es el módulo de elasticidad, también llamado módulo de Young, el cual es una medida de la deformación que puede sufrir un material cuando se le aplica una carga. El módulo de elasticidad será diferente dependiendo del fenómeno que se presente: flexión, tensión o compresión.

Generalmente, para las resinas poliéster, el módulo de elasticidad, en cualquiera de sus casos, incrementa cuando se disminuye el grado de insaturación (tabla 8). Sin embargo, a muy bajos niveles de insaturación, el módulo también disminuirá su valor.

**Tabla 8. Módulo de elasticidad contra el grado de insaturación (resina a base de propilenglicol y 40% en peso de estireno).**

	Relación molar AF:AM			Relación molar AIF:AM		
	1:2	1:1	2:1	1:2	1:1	2:1
Módulo de elasticidad [MPa]	3,861	4,068	4,137	3,723	3,999	3,930

### 2.3.6.2. Cantidad de monómero

Se ha encontrado que generalmente la resistencia a la tensión es mayor al aumentar el contenido de estireno, como se observa en los datos 1 a 4 de la tabla 5, pero cuando la resina tiene un alto contenido en insaturación, el efecto del estireno se revierte, como se observa en la tabla 9.

**Tabla 9. Resistencia a la tensión de resinas PG-AM a diferentes concentraciones de estireno.**

Estireno % peso	Resistencia a la tensión MPa
10	37.9
30	26.9
40	20.7
50	7.6

En general, la resistencia a la flexión en formulaciones que contienen MPG-AM-AF, se reduce al aumentar el contenido de estireno, excepto en resinas con bajo nivel de insaturación. En los casos de bajo nivel de insaturación, la resistencia a la flexión incrementará al incrementar el contenido de estireno (ver tabla 10).

**Tabla 10. Resistencia a la flexión en relación al contenido de estireno a diferentes grados de saturación.**

Anhídrido maleico en el poliéster (% mol)	Resistencia a la flexión (MPa) a diferentes concentraciones de estireno			
	20 % estireno	30 % estireno	40 % estireno	50 % estireno
20	34	34	49	68
40	137	108	98	98
60	132	128	123	117
80	117	108	98	93
100	98	88	86	62

### 2.3.6.3. Tipo de glicol

Como regla general, los grupos aromáticos proporcionan mayor rigidez, mientras que los compuestos con grupos éter-alifáticos incrementan la flexibilidad.

En diversas formulaciones con relaciones molares 1:1 de AM:AF, a un 30% en peso de estireno, las propiedades de flexión disminuyen al aumentar el número de oxígenos-éter en la cadena del glicol, al mismo tiempo el módulo de flexión disminuye. Se ha observado también que, aunque las formulaciones que contienen propilenglicol tienen buenas propiedades de tensión y flexión, usualmente el dietilenglicol excede las propiedades en un sistema optimizado en cuanto a los ácidos y estireno (ver tabla 11).

**Tabla 11. Efecto del tipo del glicol en las propiedades mecánicas de resinas poliéster**

Relación Molar AM:AF	Tipo de Glicol	Resistencia	Resistencia	Módulo de	
		a la tensión [MPa]	a la flexión [MPa]	Tensión [MPa]	Flexión [MPa]
40:60	MPG	43	100	6,205	3,930
55:45	MPG	51	121	6,619	4,413
75:25	MPG	46	104	6,274	3,861
40:60	DEG	62	97	3,585	2,620
55:45	DEG	77	121	4,757	3,309
75:25	DEG	69	118	4,551	3,103

De acuerdo a Boenig (1964), al emplear combinaciones de dietilenglicol con propilenglicol se logran mejores desempeños de tensión y flexión. En el caso específico cuando la resina tiene una relación molar de AM:AF de 30:70, la mejor combinación de estos glicoles se encuentra a 40:60 de propilenglicol con dietilenglicol (tabla 12).

**Tabla 12. Propiedades mecánicas de resinas poliéster con diferentes mezclas de glicoles**

Relación Molar MPG:DEG	Resistencia a la tensión [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]
40:60	73.1	-
50:50	67.6	133.8
65:35	63.4	100.0
75:25	49.0	-
80:20	45.5	91.7

El efecto que tiene la combinación de glicoles sobre las propiedades mecánicas es mayor que el efecto que tienen los glicoles por separado (Boenig, 1964).

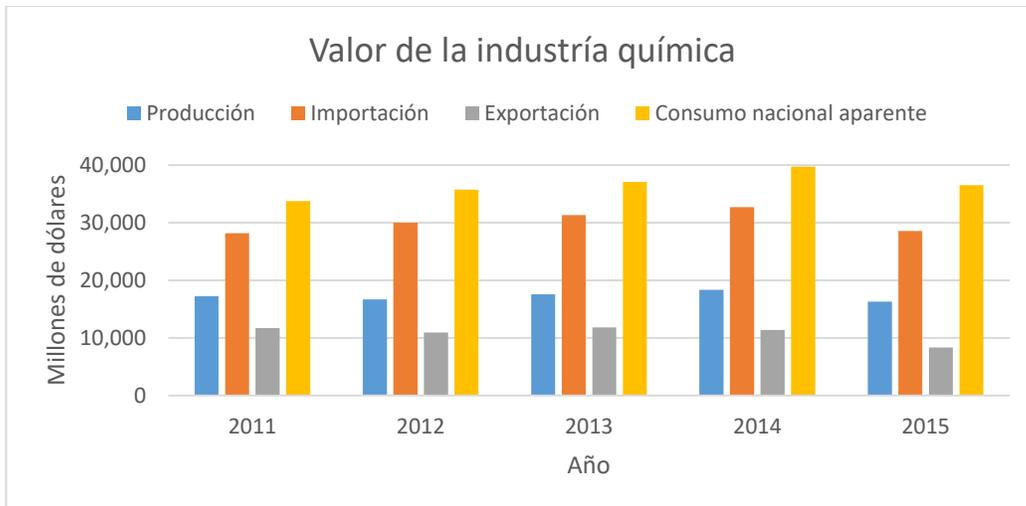
## 2.4. Análisis de mercado

### 2.4.1. Situación económica de la industria química y petroquímica

Antes de describir el mercado de las resinas poliéster insaturadas a continuación, se da una visión general de la situación de la industria química y petroquímica en México, a finales del 2015.

De acuerdo a datos de la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), la industria química aportó el 1.8% del PIB para el 2015, manteniéndose constante de acuerdo al año anterior. Sin embargo, entre el 2014 y el 2015 el volumen de producción de este sector bajo un 8.2%; de la misma manera, la capacidad instalada en uso disminuyó un 1.7% respecto al 2014 **(ANIQ, 2016)**.

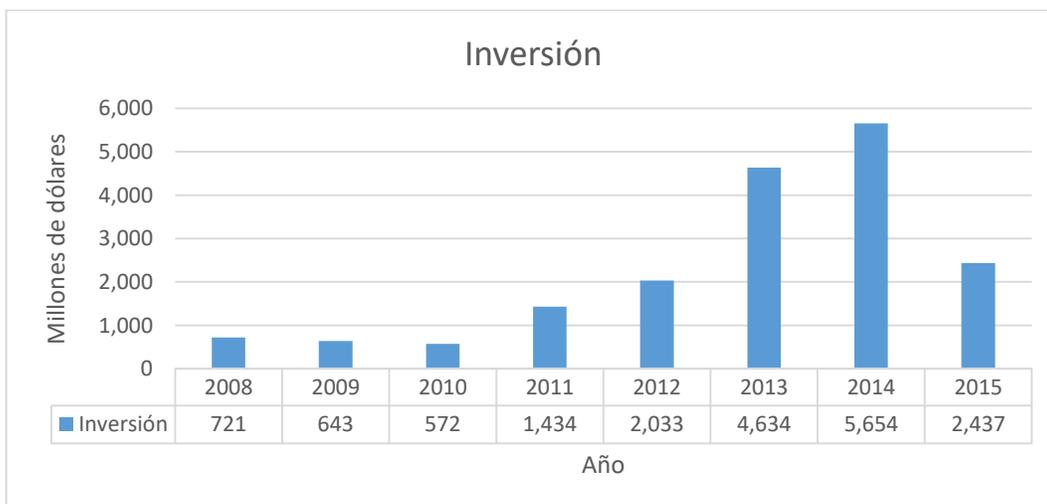
En la figura 17, se puede observar que la producción total de la industria química disminuyó 2 mil millones de dólares en el 2015. Para ese mismo año la exportación e importación disminuyeron igualmente, lo que provocó que el consumo nacional aparente (calculado como la producción más la importación menos la exportación) disminuyera un 8% respecto al año anterior **(ANIQ, 2016)**



**Figura 17. Valor de la industria química mexicana anual.**

Pese a que las importaciones disminuyeron, se encontró que, en 2015 aproximadamente el 63.5% de las materias primas fueron importadas, el resto fueron producidas en territorio nacional.

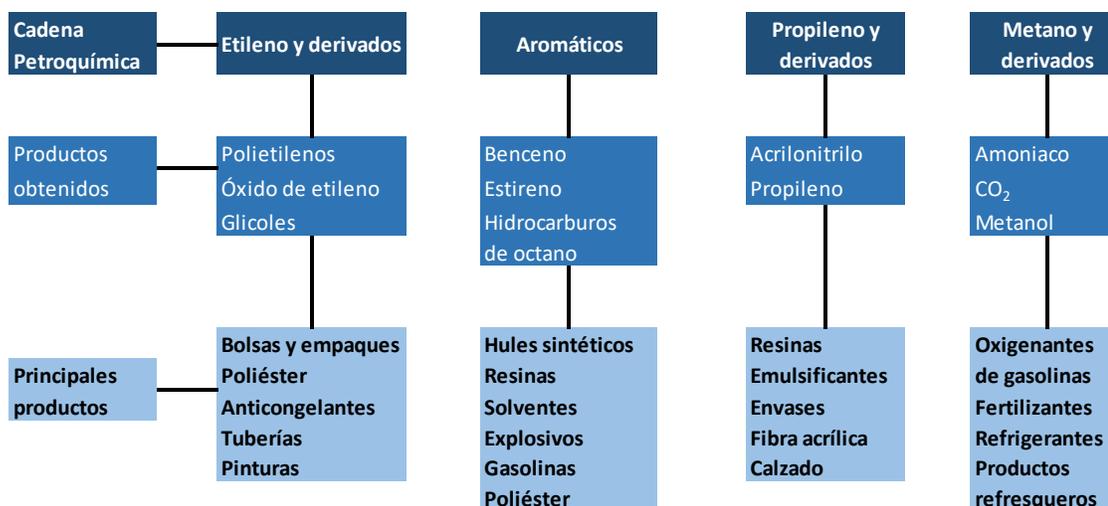
También, se reportó que entre el 2014 y el 2015 hubo un decremento en la inversión de la industria química de casi 2,500 millones de dólares, ver figura 18.



**Figura 18. Montos anuales de inversión en la industria química mexicana.**

De acuerdo a la ANIQ, la petroquímica es una serie de procesos, derivados de la refinación de petróleo crudo y/o del gas natural. Los primeros productos que se procesan son:

metano, etano, propano, butano, naftas, etc.; estos son los iniciadores de diferentes cadenas petroquímicas, ver figura 19.



**Figura 19. Productos de acuerdo a la cadena petroquímica.**

En el 2015, la industria petroquímica observó el mismo comportamiento que la industria química, es decir, el volumen de producción disminuyó un total de 1.15 millones de toneladas respecto al año anterior; de la misma manera disminuyeron las importaciones y las exportaciones, ver tabla 13 (ANIQ, 2016). Este comportamiento se puede deber al alza en el precio de los combustibles y a la baja en el precio de los hidrocarburos.

**Tabla 13. Producción de la industria petroquímica (toneladas)**

Año	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Producción</b>	11,398,727	11,180,888	11,212,228	10,821,091	9,667,327
<b>Importación</b>	5,667,740	5,817,135	5,816,465	5,974,491	5,930,752
<b>Exportación</b>	1,242,947	1,445,316	1,383,024	1,381,315	1,269,004
<b>Consumo nacional aparente</b>	15,823,520	15,552,707	15,645,669	15,414,267	14,329,075

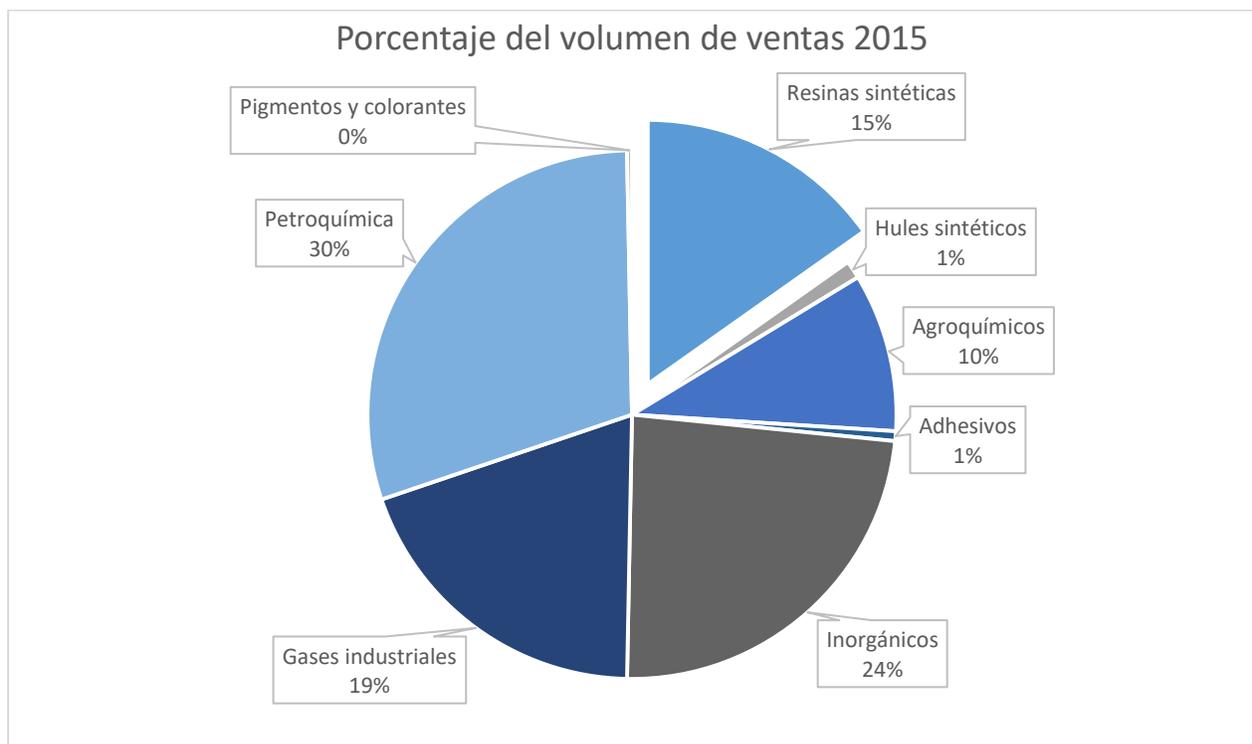
Frente a esta situación, a continuación se describir el mercado de las resinas sintéticas y de las resinas poliéster.

#### 2.4.2. Situación económica de las resinas poliéster, a nivel nacional e internacional

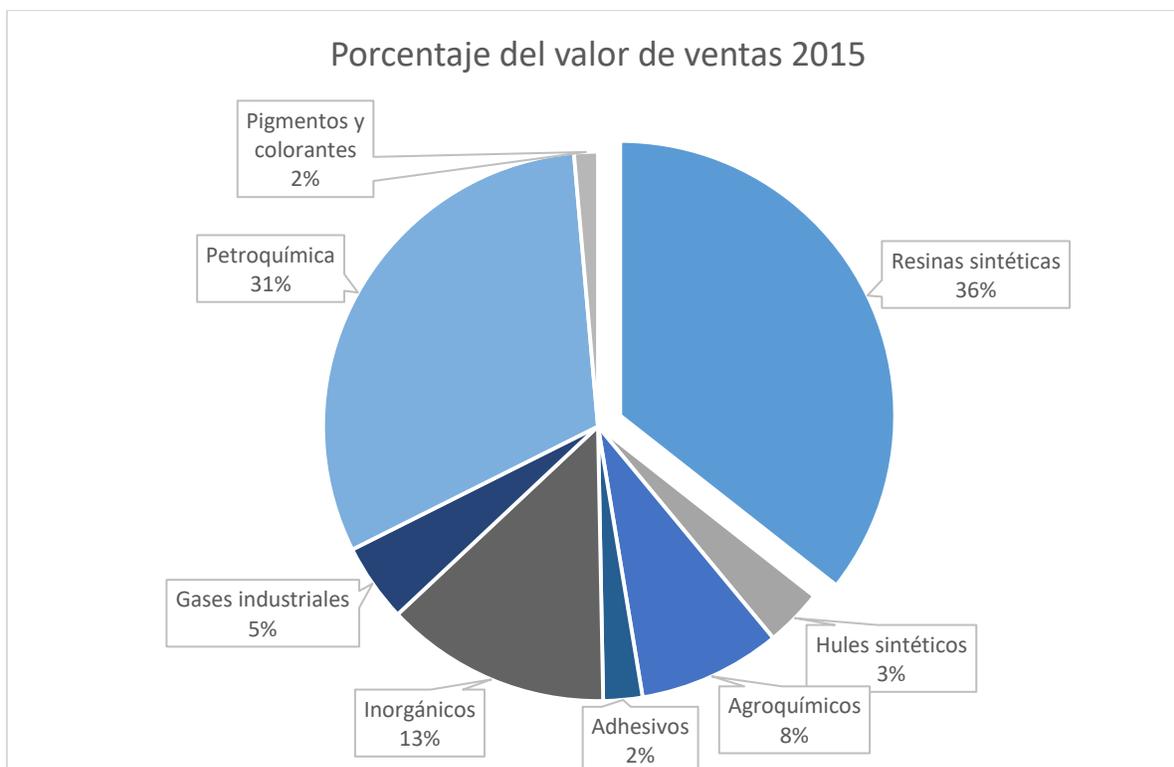
“Las resinas sintéticas son parte estructural de los productos de consumo masivo ya sea en forma de envases (botella, vasos, cajas, etc.) o en alguna otra presentación, como pastas, materiales para construcción y materiales para plomería. Sus productos constituyen la materia prima para la manufactura de artículos de plástico, así como para pinturas y adhesivos” (ANIQ, 2016).

“Su carácter estratégico, reside en la versatilidad de aplicaciones que tienen los plásticos en un gran número de industrias, como la del calzado, sustituyendo al cuero; la de la construcción y empaque, sustituyendo a la lámina estañada; y en la agricultura en la fabricación de películas para la protección de cultivos, etc.”

Para el 2015, el volumen de ventas las resinas sintéticas representó el 15.2% del total de ventas de la industria química; con ese nivel de participación, las resinas sintéticas aportaron el 35.6% del valor total de ventas de la industria química y petroquímica, ver figuras 20 y 21 (ANIQ, 2016)



**Figura 20. Porcentaje del volumen de ventas de la industria química, 2015.**



**Figura 21. Porcentaje del valor de ventas de la industria química, 2015.**

De manera general, las resinas sintéticas mostraron un decremento en su producción del 1.9% en el 2015 y el consumo nacional aparente fue de casi 6.5 miles de toneladas para el mismo año (tabla 14).

**Tabla 14. Producción y consumo de resinas sintéticas a nivel nacional.**

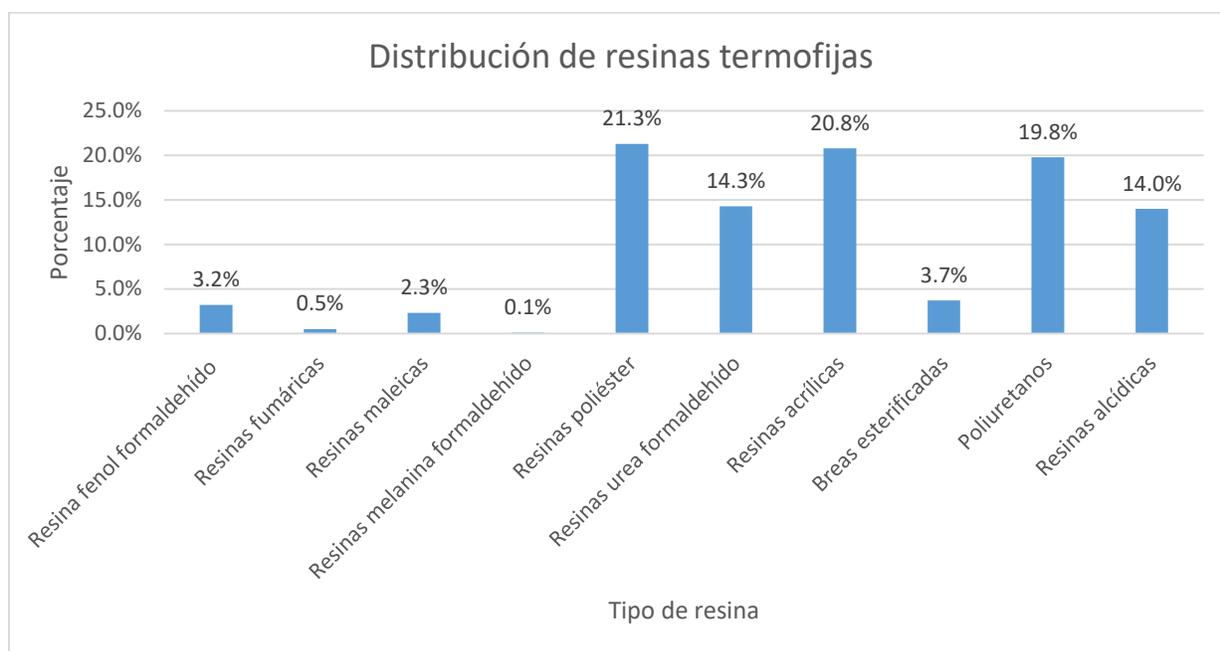
Año	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Producción</b>	3,424,989	3,587,045	3,691,676	3,653,838	3,584,180
<b>Importación</b>	3,615,810	4,914,698	5,180,593	4,547,368	4,391,280
<b>Exportación</b>	1,472,619	1,959,731	1,823,917	1,587,517	1,497,131
<b>Consumo nacional aparente</b>	5,568,180	6,542,012	7,048,352	6,613,689	6,478,329

Para el reporte anual estadístico del ANIQ, las resinas sintéticas se dividen en: resinas termoplásticas, resinas termofijas y emulsiones. De acuerdo a los datos del 2015, las resinas termoplásticas participaron con el 87% de producción en el mercado de resinas, las termofijas y las emulsiones participaron con el 6.2% y 6.8% respectivamente.

Dentro de la clasificación de las resinas termofijas se reconocen las siguientes resinas:

- Resina fenol formaldehído
- Resinas fumáricas
- Resinas maleicas
- Resinas melanina formaldehído
- Resinas poliéster
- Resinas urea formaldehído
- Resinas acrílicas
- Breas esterificadas
- Poliuretanos
- Resinas alcídicas

En la figura 22, se muestran los porcentajes de producción de cada tipo de resina termofija.



**Figura 22. Porcentaje del volumen de producción de resinas termofijas, 2015**

En cuanto a la producción y consumo general de las resinas termofija se encontró que, en el 2015 la producción aumentó un 19.1% respecto al 2014, mientras que el consumo aparente también incremento un 21.7%; para este periodo de tiempo, las resinas termofijas son las únicas que demostraron este comportamiento al alza, como se observa en la tabla 15.

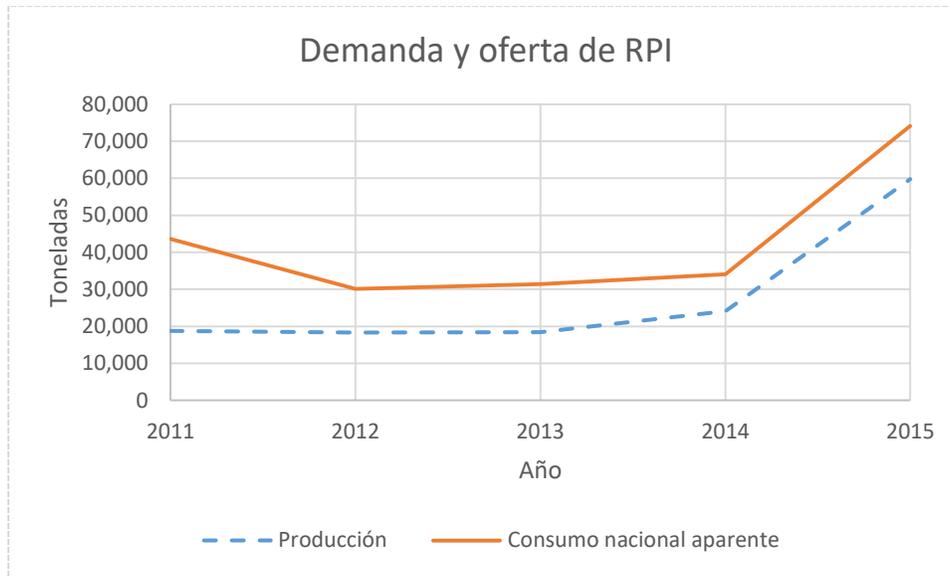
**Tabla 15. Comportamiento del comercio de resinas sintéticas entre 2014 y 2015.**

	2014	2015	Variación
	Producción		
Resinas termoplásticas	3,224,159	3,118,850	-3.3%
Resinas termofijas	186,991	222,724	19.1%
	Importación		
Resinas termoplásticas	1,941,350	2,355,450	21.3%
Resinas termofijas	51,164	63,072	23.3%
	Exportación		
Resinas termoplásticas	1,279,413	1,278,007	-0.1%
Resinas termofijas	26,687	28,354	6.2%
	Consumo aparente		
Resinas termoplásticas	3,886,096	4,196,293	8.0%
Resinas termofijas	211,468	257,442	21.7%

Entre el 2014 y el 2015, el volumen de producción de resinas poliéster aumentó 35 mil toneladas, en el mismo periodo las importaciones aumentaron un 24.4% y las exportaciones un 5.2%. Como resultado, las resinas poliéster al terminar el 2015 se consumieron más del 100% respecto al año anterior, tabla 16 y figura 23.

**Tabla 16. Comportamiento del mercado de resinas poliéster (toneladas).**

Año	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Producción</b>	18,797	18,319	18,385	24,100	59,790
<b>Importación</b>	31,930	19,167	19,921	20,209	25,135
<b>Exportación</b>	7,152	7,402	6,885	10,242	10,772
<b>Consumo nacional aparente</b>	43,575	30,084	31,421	34,067	74,153



**Figura 23. Demanda y oferta de las RPI**

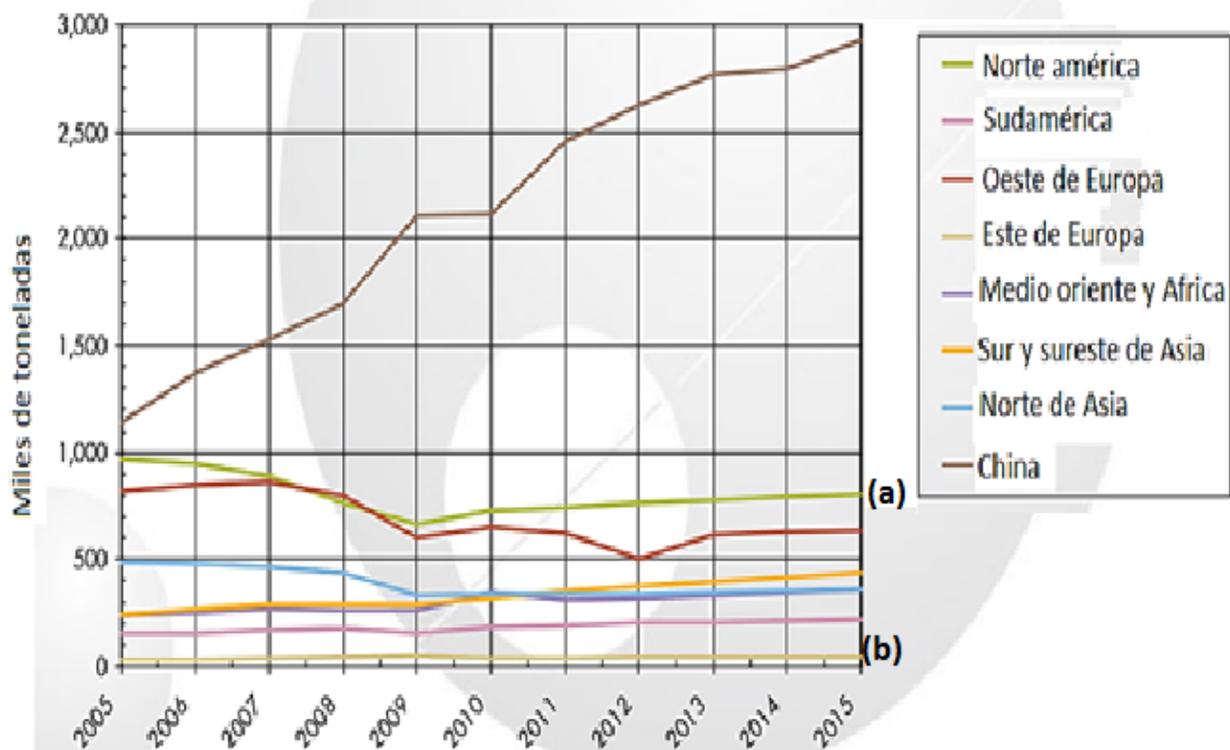
En cuanto al mercado de las exportaciones e importaciones de las RPI, el ANIQ reportó que al finalizar el 2015 el valor de las importaciones aumentó un 6.8%, mientras que el de las exportaciones disminuyó un 4.1%, tabla 17.

**Tabla 17. Comercio exterior de resinas poliéster (miles de dólares corrientes a 2016)**

Año	Importaciones	Exportaciones
2011	49,654	16,336
2012	58,017	18,388
2013	69,906	18,153
2014	67,342	25,126
2015	71,927	24,090

De acuerdo a IHS Markit, China es el país con mayor crecimiento de producción de resinas poliéster insaturadas, acaparando hasta el 60% de la producción mundial y aunque se espera que China continúe consolidándose como el mayor productor, el reporte señala que parte importante de la producción norteamericana se ha movido hacia México durante el 2016 (IHS Markit, 2016).

La figura 24, muestra los datos recolectados por Tecnon OrbiChem; de acuerdo a esta figura, Norteamérica produciría para el 2015 un aproximado de 800 mil toneladas de resinas poliéster (figura 24a); si ese dato lo comparamos con la producción nacional (59.8 mil toneladas, tabla 16), México en el 2015 aportó aproximadamente el 8.8% de la producción total de esta zona comercial (figura 24b) (Davies, 2012).



**Figura 24. Producción mundial de RPI's**

Varios estudios internacionales reportan que es posible que el mercado de las resinas poliéster insaturadas crezca de los 7 billones de dólares (datos del 2014), hasta los 13 billones de dólares para el 2022, con un crecimiento global anual de 7%. Estos reportes segmentan el mercado de las RPI en: orto-ftálicas, iso-ftálicas, DCPD y otras, ver figura 25 (Global Market Insights, 2016).

De acuerdo a las predicciones, las resinas orto-ftálicas tendrán un crecimiento anual del 7.6%, el cual podría deberse a que este tipo de resinas son las más empleadas en materiales reforzados con fibra de vidrio, con aplicación en los mercados de marina, construcción y transporte, ver figura 26 (Global Market Insights, 2016). Cada vez más se prefiere cambiar algunos materiales de construcción por materiales que incluyan las resinas poliéster, ya que son más baratas en comparación, es decir, la demanda de RPI ha provocado que el mercado aumente su producción y por ello a nivel mundial y nacional observamos crecimientos muy atractivos en la producción de resinas poliéster.

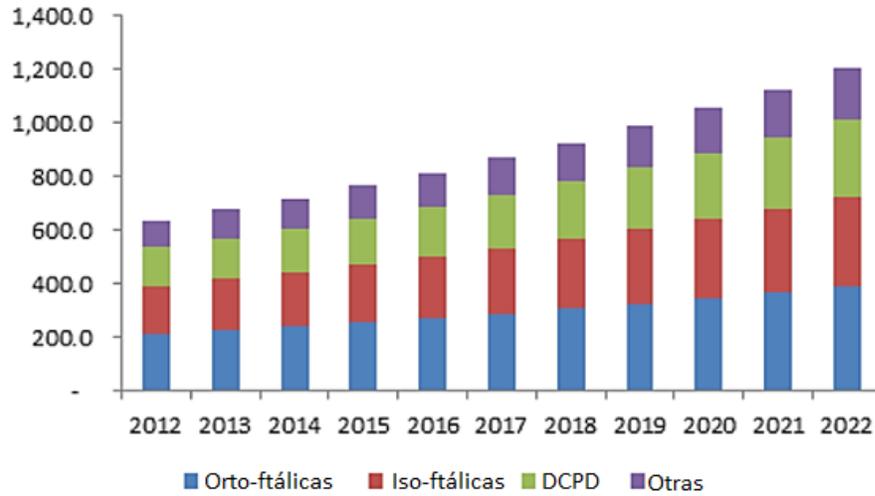


Figura 25. Mercado europeo de RPI del 2012 a 2022 por tipo de producto (en miles de toneladas).

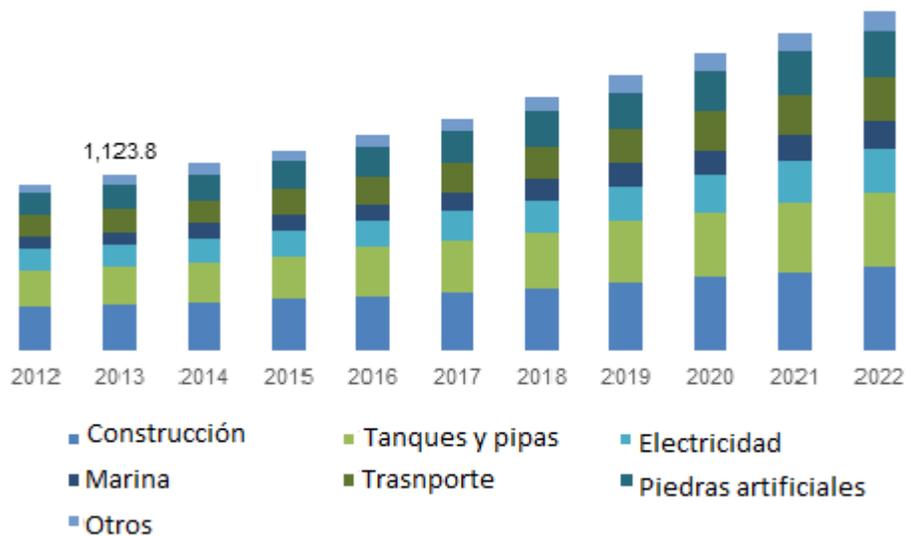


Figura 26. Mercado europeo de RPI del 2012 a 2022, por destino final (millones de dólares).

### 2.4.3. Situación del mercado de las materias primas para RPI

De acuerdo a Davies (2012), la variación en los precios de las resinas poliéster insaturadas, se debe en gran medida a la volatilidad de los precios de algunas de sus materias primas, principalmente el estireno. A continuación, se muestra un panorama general del mercado de las materias primas para la producción de las RPI.

De acuerdo al INEGI, el Índice Nacional de Precios al Productor (INPP) sirve como herramienta para medir la inflación asociada a la producción, es decir, mide la variación de costos de una canasta básica para la producción. En su informe *La industria química en México 2014*, el INEGI reportó que el INPP de la industria de resinas sintéticas bajó un 1.33% respecto al 2012. Esto representó que algunos factores de la producción disminuyeron su precio, volviendo aparentemente más barato el costo de producción, tabla 18 (INEGI, 2015).

**Tabla 18. Variación del INPP con servicios en la industria química, rama de resinas y hules sintéticos**

Año	2010	2011	2012	2013	2014
Índice	85.4	95.9	97.6	94.9	96.3
Variación (%)	-12.50	-1.74	0.00	-2.77	-1.33

En ese mismo reporte, el INPP de las materias primas, exclusivamente para el sector de resinas sintéticas, tuvo un incremento del 1.65% entre el 2012 y 2014, lo cual quiere decir que el costo de las materias primas, para la producción de resinas sintéticas, ha aumentado en un periodo de dos años, ver tabla 19 (INEGI, 2015).

**Tabla 19. Variación del INPP de materias primas con servicios en la industria química, rama de resinas y hules sintéticos.**

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Índice	78.1	85.6	93	97	97.7	98.6
Variación (%)	-19.48	-11.75	-4.12	0.00	0.72	1.65

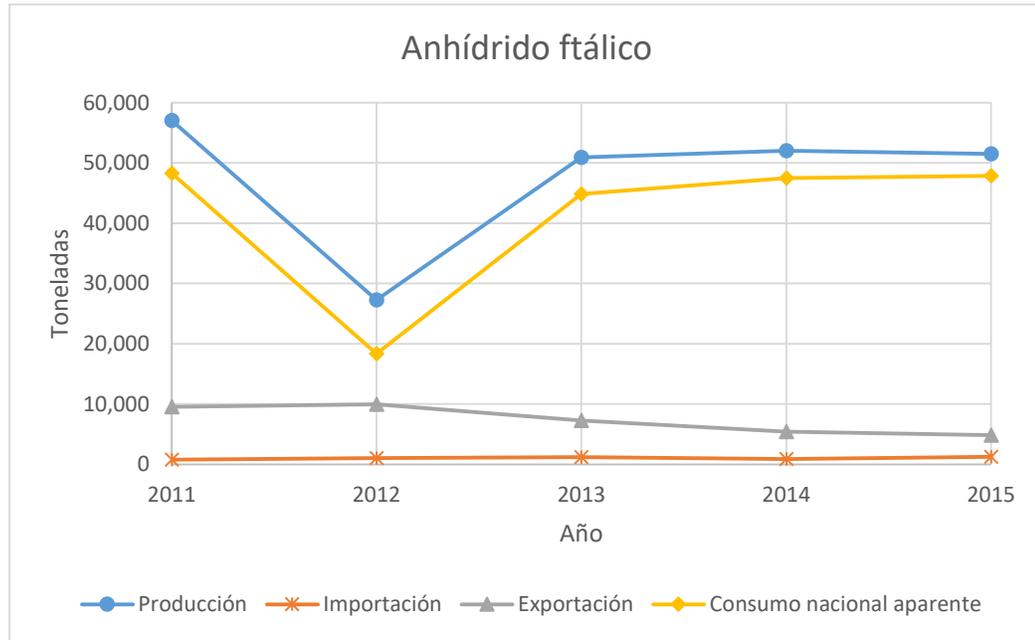
Es importante que, a pesar del comportamiento de las materias primas y servicios, se tome en cuenta la capacidad de producción e importación de las principales materias primas, como el anhídrido maleico, anhídrido ftálico, etilenglicoles, propilenglicoles, estireno, etc. Para este ejercicio se recopilaron datos del ANIQ y del INEGI, siendo los más actuales los del ANIQ.

De acuerdo al INEGI, en México existe, desde el 2002, una capacidad instalada para producir anhídrido maleico de 7,000 toneladas, no obstante, desde el 2003 la demanda de este anhídrido es cubierta por importación, tabla 20.

**Tabla 20. Producción y consumo nacional de anhídrido maleico**

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Producción	5,675	0	0	0	2,520	0
Importación	6,189	10,820	11,814	13,466	13,067	12,753
Exportación			155	320	465	0
Consumo	<u>11,864</u>	<u>10,820</u>	<u>11,659</u>	<u>13,146</u>	<u>15,122</u>	<u>12,753</u>

El ANIQ reportó que del 2011 al 2015, la producción de anhídrido ftálico ha disminuido aproximadamente 6 mil toneladas; en ese mismo periodo el consumo decreció desde 48.3 a 47.8 mil toneladas, debido a que entre el 10% y 17% de la producción nacional se exporta, ver figura 27.



**Figura 27. Producción y consumo nacional de anhídrido ftálico**

En cuanto a los glicoles, el ANIQ reportó que el mercado de los etilenglicoles entre el 2014 y el 2015, disminuyó su producción cerca de 230 toneladas, al igual que las importaciones, con aproximadamente 5,800 toneladas menos, mientras que el consumo decreció unas 5,500 toneladas, tabla 21.

**Tabla 21. Producción y consumo de etilenglicoles a nivel nacional**

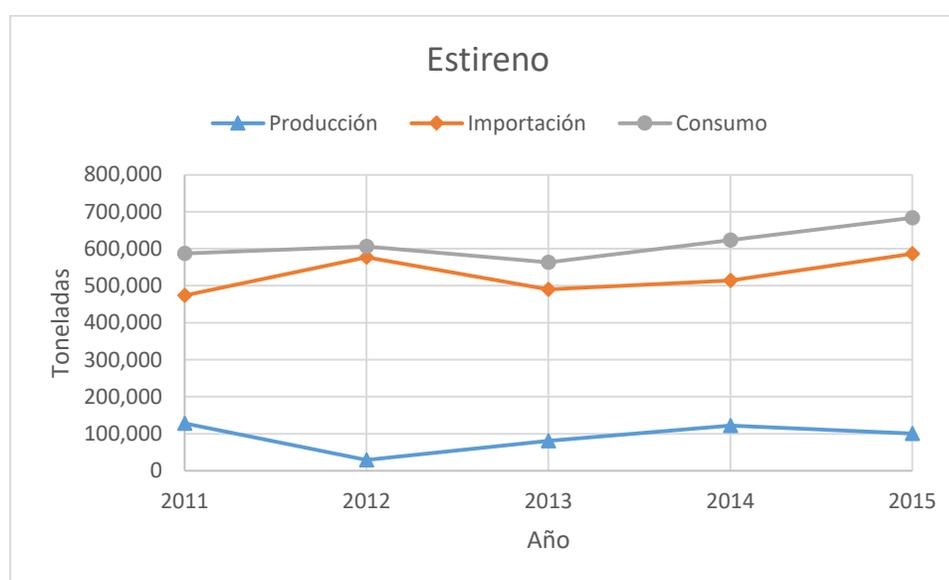
Año	2011	2012	2013	2014	2015
Producción	273,336	266,308	281,594	266,158	265,934
Importación	217,392	185,064	157,007	188,082	182,297
Exportación	2,076	4,965	3,511	987	533
Consumo	488,652	446,407	435,090	453,253	447,698

Por otro lado, el INEGI reporta que existe una capacidad instalada de 30,000 toneladas para la producción de propilenglicoles, pero desde el 2002 todo el abasto nacional es importado. Aproximadamente 23 mil toneladas se importaron en el 2007, con lo que el consumo nacional de este tipo de glicoles aumentó en 2,300 toneladas respecto al año anterior, tabla 22.

**Tabla 22. Consumo y producción de propilenglicoles a nivel nacional**

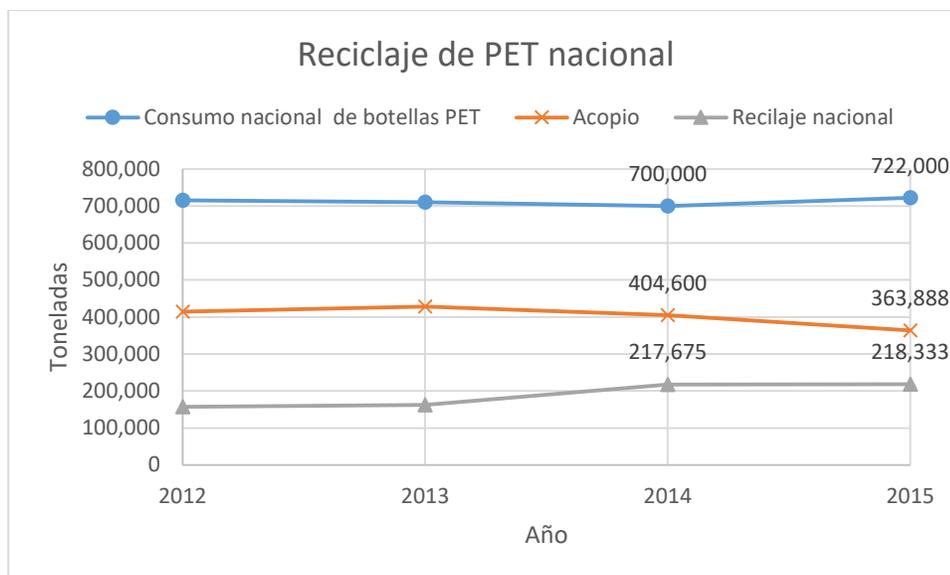
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Producción	0	0	0	0	0	0
Importación	22,073	17,961	20,467	23,330	21,176	23,921
Exportación			353	363	540	993
Consumo	<u>22,073</u>	<u>17,961</u>	<u>20,114</u>	<u>22,967</u>	<u>20,636</u>	<u>22,928</u>

Por otra parte, el consumo de estireno ha aumentado un 9.7% entre el 2014 y el 2015, aunque en ese periodo las importaciones aumentaron un 14% y la producción disminuyó un 17.5%; como se puede observar en la figura 28, aproximadamente 85.8% de la demanda nacional de estireno es cubierta por importación.



**Figura 28. Consumo y producción nacional de estireno.**

Por último, los datos sobre el reciclaje del PET de la ECOCE muestran que, en el 2015 el consumo nacional aparente de PET fue de 722 mil toneladas, de las cuales solo el 50.4% se recolectó en centros de acopio después del consumo de botellas PET, y de esa cantidad el 60% se recicló en México y el resto se exportó, ver figura 29 (ECOCE, 2015).



**Figura 29. Reciclaje nacional de PET**

De este análisis de mercado podemos decir que el aumento en la demanda de RPI y la baja en los precios de producción para el sector de las resinas sintéticas, parece indicar que invertir en esta industria tendría ganancias en el futuro. Otro soporte para esta hipótesis es que los pronósticos indican que este mercado seguirá creciendo, al punto en que a nivel internacional podría aumentar un 70% el consumo de estos materiales.

También es importante señalar que el precio de las resinas se ve afectado en mayor medida por el costo del estireno y del anhídrido maleico, siendo el primero el más cambiante en lo que va del 2017, sin embargo por el tipo de formulación que se propone, el costo final de la resina puede ser competitivo en el mercado, ya que el PET de desecho es de muy bajo costo en comparación con el anhídrido ftálico, aumentar su concentración en la formulación puede amortizar el efecto que tiene el precio cambiante del estireno.

### 3. Desarrollo del proyecto

Este proyecto lo componen dos partes importantes; el trabajo de laboratorio, que consiste en desarrollar un material que consiga mejores propiedades de tensión en comparación con resinas comerciales; y la segunda parte que es el desarrollo de la ingeniería básica para la planta de proceso. Como resultado de ambas partes se puede obtener un estimado de costos e indicadores de inversión (VPN y TIR) que permiten tener un estimado clase IV. Al obtener estos indicadores con el rango respecto de seguridad, podría ser posible para algunos inversionistas tomar una decisión sobre invertir en el proyecto.

A continuación, se describen cada una de las etapas que se llevaron a cabo para desarrollar el presente proyecto. La primera etapa consistió en establecer una metodología para medir la resistencia a la tensión de materiales como las RPI, con base en la norma ASTM D-0638. En la siguiente etapa se llevó a cabo la evaluación mecánica de resinas comerciales. Posteriormente, se desarrollaron formulaciones de resinas poliéster insaturadas, las cuales tenían un mayor contenido de anhídrido maleico e incluían PET de desecho en su estructura. Después, se evaluaron las propiedades de tensión de las formulaciones desarrolladas para la elección de la resina con el mejor desempeño mecánico. Una vez seleccionada la formulación se desarrolló el diseño de la planta industrial con capacidad de 6,000 toneladas anuales; este diseño está constituido por la descripción del proceso y la elaboración del balance de materia y energía. Por último, se obtuvieron los indicadores de inversión para dicho diseño.

La metodología y los resultados de cada uno de los puntos anteriores se presentan a continuación.

#### 3.1. *Metodología de medición de tensión y evaluación de mecánica de resinas comerciales*

Para este fin se consiguieron 6 resinas comerciales preaceleradas: 4 *orto-ftálicas*, una *iso-ftálica* y una *tere-ftálica*, las claves y algunas características se muestran en la tabla 23.

**Tabla 23. Claves y características de resinas comerciales**

Clave de resina	Nombre y tipo	Color	Volátiles (%)	Temp. de exotermia (°C)	Tiempo de curado (min)
RCO	Resina Comercial <i>Orto-ft</i> álica 1	Café rojizo opaco	30-35	140-160	30-45
RCO2	Resina Comercial <i>Orto-ft</i> álica 2	Café rojizo opaco	30-35	140-160	30-45
RCO3	Resina Comercial <i>Orto-ft</i> álica 3	Rosa opaco	30-35	140-160	30-45
RCO4	Resina Comercial <i>Orto-ft</i> álica 4	Rosa traslucido	30-35	140-160	30-45
RCI1	Resina Comercial <i>Iso-ft</i> álica 1	Rosa traslucido	30-35	140-160	30-45
RCT1	Resina Comercial <i>Tere-ft</i> álica 1	Rosa opaco	30-35	140-160	30-45

Las pruebas de resistencia a la tensión se realizaron bajo la norma ASTM-638, en un equipo Instron 3345, ver figura 30.



**Figura 30. Equipo Instron 3345.**

Para poder realizar las pruebas de resistencia a la tensión, primero se entrecruzó cada resina en moldes de silicón con las dimensiones de la probeta de acuerdo a la norma (ASTM D-0638). Para curar las resinas se siguió la siguiente metodología.

- I. Pesar aproximadamente 50 g de resina preacelerada en un vaso desechable
- II. Añadir 1% en peso de catalizador, peróxido de metiletilcetona (MEKP)
- III. Agitar por 2 minutos
- IV. Verter aproximadamente 7 g en cada ranura del molde de silicón, ver figura 31
- V. Esperar a que cure en el molde
- VI. Desmontar probeta al siguiente día



**Figura 31. Molde de silicón con probetas de resina para prueba de tensión**

De acuerdo a Abdel-Azim A. (1996), las propiedades mecánicas de las RPI varían con el tiempo de curado, por ello se realizaron pruebas con dos resinas, RCO1 y RCO2, en tiempos de 2, 4, 7, 9, 11, 14 y 23 días de curado, los resultados de la prueba de tensión se muestran en las tablas 24 y 25.

**Tabla 24. Variación de resistencia a la tensión con el tiempo para RCO1.**

Resina RCO1								
Días de curado	(días)	2	4	7	9	11	14	23
Resistencia a la tensión	(MPa)	28.75	34.01	39.60	44.65	42.22	41.30	43.54
Módulo de tensión	(MPa)	663.55	819.44	905.37	944.56	875.18	937.31	999.99
Carga máxima	(N)	751.84	889.45	1035.75	1167.93	1104.19	1080.12	1138.79
Deformación a ruptura	(mm)	9.08	6.36	4.87	4.01	4.44	4.13	3.82

**Tabla 25. Variación de resistencia a la tensión con el tiempo para RCO2.**

Resina RCO2								
Días de curado	(días)	2	4	7	9	11	14	23
Resistencia a la tensión	(MPa)	25.94	27.82	31.63	40.48	41.13	42.31	42.99
Módulo de tensión	(MPa)	648.97	698.40	820.55	962.92	939.18	1034.81	978.02
Carga máxima	(N)	678.47	727.59	827.30	1058.85	1075.64	1106.67	1124.38
Deformación a ruptura	(mm)	6.36	4.67	3.80	3.41	4.28	3.26	2.86

De las tablas 24 y 25 se observa que los resultados efectivamente varían con el paso del tiempo, en general con mayor tiempo de curado, se aumentan las propiedades de resistencia a la tensión, módulo de tensión y carga máxima; sin embargo, a mayor tiempo de curado menor deformación a la ruptura. Este comportamiento se debe a que, con el paso del tiempo, la resina termina de entrecruzar el mayor número de moléculas, lo cual no sucede en los primeros días de curado.

Con estos resultados, se decidió que para todas las pruebas que se hicieran en el futuro, se dejaría reposar la resina 7 días para después realizar la prueba de tensión. Los resultados de las resinas comerciales, se muestran a continuación.

**Tabla 26. Resultados de ensayo de tensión para las resinas comerciales**

Resina	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de tensión (MPa)	Carga máxima (N)	Deformación a la ruptura (mm)
RCO1	39.00	872.52	898.92	4.72
RCO2	42.79	900.87	1086.94	4.02
RCO3	36.85	759.73	898.76	<b>5.50</b>
RCO4	48.475	1039.039	1267.858	3.484
RCI1	43.58	1018.04	1071.54	2.78
RCT1	41.57	917.50	1001.52	4.37

Los resultados de las pruebas muestran que las resinas RCO4 y RCI1 tienen los mayores desempeños de resistencia a la tensión. De la RCI1 podemos decir que al ser iso-ftálica se esperaba que su desempeño fuera mejor que sus homologas orto-ftálicas, mientras que, para la RCO4 no se tiene información suficiente que permita decir porque fue la resina con mejor desempeño de tensión.

Suponiendo que las resinas orto-ftálicas tienen una formulación típica como la que describe Kandelbauer; et al., (2014); con 1.5 mol de anhídrido ftálico (AF), 2.7 mol de monopropilenglicol (MPG) y 1 mol de anhídrido maleico (AM), podemos decir que las resinas comerciales emplean de un 20% a un 30% en mol de insaturación es decir de anhídrido maleico.

De acuerdo a lo que se describió en la sección 2.3.6.1. *Efecto de los ácidos carboxílicos (grado de insaturación y tipo de ácido saturado)*; una de las maneras para aumentar las propiedades mecánicas es aumentar la cantidad de insaturación en el poliéster, por ello la siguiente etapa consistió en aumentar la cantidad de anhídrido maleico en la formulación de una resina.

### **3.2. Desarrollo de la formulación de la resina poliéster insaturada con mayor contenido de anhídrido maleico**

La síntesis de una resina poliéster consistió en tres etapas: depolimerizar el PET con MEG, realizar la reacción de esterificación con AM y AF y al final mezclar el poliéster con estireno. A continuación, se describe la metodología de cada etapa.

a) Depolimerización del PET en reactor a presión (figura 32), se trabajó con las condiciones de reacciones que se encuentran en el trabajo de Alcocer Márquez, que lleva por título, *Estudio y valoración del reciclaje químico del poli-(tereftalato de etileno), PET*, (2017):

- a. Cargar al reactor PET post-consumo, triturado, lavado y seco
- b. Cargar monoetilenglicol, en proporción 30 g PET: 70 g de glicol
- c. Añadir catalizador, acetato de zinc
- d. Calentar hasta 240 °C y mantener por 90 min
- e. Enfriar hasta 160 °C y vaciar en reactor para esterificación



**Figura 32. Reactor PARR modelo 4562**

- b) Reacción de esterificación
- a. Cargar al reactor los anhídridos (maleico y ftálico), figura 33
  - b. Burbujea nitrógeno, aproximadamente una burbuja por minuto
  - c. Calentar hasta 180 °C, agitar a 200 RPM y mantener por dos horas
  - d. Calentar hasta 200-205 °C hasta observar que la rapidez de destilación de agua disminuya
  - e. Medir número de ácido. Medición con titulación convencional con NaOH 1N, en solución de acetona-etanol (50% en peso)
  - f. Aumentar flujo de nitrógeno
  - g. Detener calentamiento cuando el número ácido alcance 40-35 mg KOH/g



**Figura 33. Reactor de esterificación**

- a) Mezclado con monómero de estireno
- Previo al final de la reacción de esterificación, pesar estireno con una relación 70% en peso de poliéster con 30% en peso de monómero, enfriar en baño de hielo
  - Pesar inhibidor, hidroquinona (HQN), con relación 0.04 g de HQN por cada 100 g de poliéster
  - Disolver inhibidor en etanol y agregar 90% de la mezcla en estireno frío, y el 10% restante en el reactor de esterificación una vez terminada la reacción
  - Enfriar mezcla del reactor hasta 140 °C y después añadir lentamente al monómero de estireno con agitación vigorosa
  - Seguir agitando por 40 minutos y dejar enfriar hasta temperatura ambiente

Posteriormente, se sintetizaron 6 resinas las que recibieron las claves RPS1, RPS2,..., RPS6. A continuación, se describe la composición de las mejores resinas.

**Tabla 27. Composición de resinas poliéster sintetizadas**

	ID	ITEM	Carga (g)	% mol	% peso de estireno
RPS1	AM	Anhídrido maleico	127.38	37.89	28
	AF	Anhídrido ftálico	42.79	7.51	
	PETG	PET glicolizado	205	-	
	MEGA	Monoetilenglicol ajuste	10	-	

RPS5	ID	ITEM	Carga (g)	% mol	27.7
	AM	Anhídrido maleico	62.47	35.66	
	AF	Anhídrido ftálico	10.58	3.57	
	PETG	PET glicolizado	130.1	-	
RPS6	ID	ITEM	Carga (g)	% mol	28
	AM	Anhídrido maleico	76	39.99	
	AF	Anhídrido ftálico	12.80	4.00	
	PETG	PET glicolizado	130.1	-	

Con la composición de cada resina se prosiguió a realizar las pruebas de tensión de estas tres resinas sintetizadas.

### 3.3. Evaluación mecánica de formulaciones desarrolladas

Estas resinas no tenían en su formulación un acelerador para el curado; por lo que fue necesario, añadir 0.25% en peso de octoato de cobalto a cada muestra de resina para el entrecruzamiento. El proceso para realizar el curado, después de agregar el acelerador, fue el mismo descrito en la sección 3.1. *Evaluación mecánica de resinas comerciales.*

Los resultados de la prueba de tensión se muestran en la tabla 28.

**Tabla 28. Resultados de ensayo de tensión de resinas sintetizadas**

Resina	%mol de anhídrido maleico	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de Tensión (MPa)	Carga Máx. (N)	Extensión a la ruptura (mm)
<b>RPS1</b>	37.89	52.79	1109.94	1338.04	2.58
<b>RPS5</b>	35.66	35.26	787.93	893.28	9.23
<b>RPS6</b>	40	32.88	742.81	812.25	3.33

Al comparar las resinas sintetizadas, podemos observar que al incrementar la concentración mol de anhídrido maleico, las propiedades de tensión también aumentan, pero al

alcanzar 40% en mol de AM las propiedades disminuyen, es decir, existe un límite de concentración de AM donde las propiedades alcanzan un máximo. Si ahora se comparan, los datos de resistencia a la tensión de la RPS1 con los datos de las resinas comerciales (tabla 26), se puede observar que esta resina superó el desempeño mecánico de todas las resinas comerciales.

Es importante mencionar que al emplear monoetilenglicol en la formulación, se pudo observar que este glicol vuelve ligeramente incompatible a la resina con estireno (no se pudieron alcanzar concentraciones de estireno mayores a 28% en peso). Para mejorar la compatibilidad de la resina se podría sustituir, en la glicólisis del PET una cantidad de MEG por MPG, ya que este glicol cuenta con una ramificación, lo que vuelve al poliéster más compatible con el monómero; Abdel-Azim A., 1996; Goodman, 1998.

Debido a su mejor desempeño en el ensayo de tensión, se escogió la formulación de la RPS1 como la formulación base del diseño de la planta, la tabla 29 muestra la formulación base para 1 kg de resina.

**Tabla 29. Formulación para diseño de planta**

ID	ITEM	Carga (g)	%mol en poliéster	%peso de RPI
AM	Anhídrido maleico	318	37.33	
AF	Anhídrido ftálico	89.8	6.22	
PETr	PET reciclado	202.4	-	
MEG	Monoetilenglicol	281	-	
MPG	Monopropilenglicol	28	-	
EST	Estireno	365	-	30
HQN	Hidroquinona	0.38	-	
OCo	Octoato de cobalto	25	-	

Una vez seleccionada la formulación se prosigue con el diseño del proceso y la planta

### **3.4. Descripción del proceso para producir 6,000 ton/año de una RPI, con base a la formulación escogida**

El proceso para producir la RPI se describe a continuación:

- I. Cargar al reactor de glicólisis PET reciclado, MEG y MPG (90:10 en peso), en relación  $30 g_{PET}$  por cada  $70 g_{glicol}$ , agregar a la mezcla catalizador (acetato de zinc)

al 0.1% en peso respecto al PET. Calentar la mezcla hasta 240 °C y 3 bar, mantener temperatura durante 6-7 horas. Enfriar hasta 110 °C y trasladar producto al reactor de esterificación

- II. En el reactor de esterificación cargar anhídridos, maleico y ftálico. Introducir gas inerte por burbujeo desde el fondo del reactor. Calentar lentamente la mezcla hasta 170-180 °C y recolectar agua de reacción por el sistema de condensación
- III. Mantener calentamiento durante 6-7 horas, hasta observar que la rapidez de eliminación de agua disminuya considerablemente; una vez que suceda esto, calentar hasta 200 °C y monitorear número de ácido
- IV. Para disminuir el número de ácido a valores debajo de 40 mg KOH/ g, aumentar ligeramente el flujo de nitrógeno. Una vez dentro de especificación, detener el calentamiento, enfriar hasta 140 °C y agregar solución de inhibición (hidroquinona en etanol)
- V. Trasladar el poliéster al tanque de mezclado, donde debe cargarse previamente estireno con la disolución de inhibición. El mezclado debe hacerse lentamente, con agitación vigorosa y sin rebasar 80 °C
- VI. Continuar con agitación y enfriar la mezcla hasta temperatura ambiente. Una vez estabilizada la solución añadir acelerador (octoato de cobalto), integrar y vaciar en contenedores para traslado

Adicionalmente, a continuación se describen las etapas del proyecto.

- a) Estudio de mercado de las resinas poliéster
- b) Consulta con expertos sobre la formulación y operación de plantas de RPI
- c) Investigación de tecnologías para la producción de RPI
- d) Desarrollo de ingeniería conceptual: pruebas a nivel laboratorio
- e) Estimado de costos clase V
- f) Establecimiento de bases de diseño
- g) Desarrollo de ingeniería básica
- h) Estimado de costos clase IV
- i) Procura de equipos
- j) Desarrollo de ingeniería conceptual
- k) Estimado de costos clase III
- l) Construcción de planta
- m) Pruebas y puesta en marcha

- n) Estimado de costos clase II
- I. Operación y cierre de proyecto

El actual trabajo comprende del apartado a hasta el apartado h.

Debido a la cantidad de materia necesaria para producir (la cual se discutirá en la siguiente sección), la planta de proceso consta de dos reactores de glicolisis, dos reactores de esterificación y dos tanques de ajuste, además de sus respectivas bombas. La tabla 30 es la lista de equipo para la zona de proceso de acuerdo a la descripción anterior y al diagrama de flujo de proceso, DFP (figura 34)

**Tabla 30. Lista de equipo para DFP de zona de reacción**

Nombre de equipo	Clave	Cantidad
Bombas de glicolisis	BA-001 A/B	2
Bombas de esterificación	BA-002 A/B	2
Condensadores de glicólisis	CH-001 A/B	2
Condensadores de esterificación	CH-002 A/B	2
Recipientes de condensado de glicólisis	DS-001 A/B	2
Recipientes de condensado de esterificación	DS-002 A/B	2
Reactores de glicólisis	TR-001 A/B	2
Reactores de esterificación	TR-002 A/B	2
Tanques de mezclado y ajuste	TZ-001 A/B	2

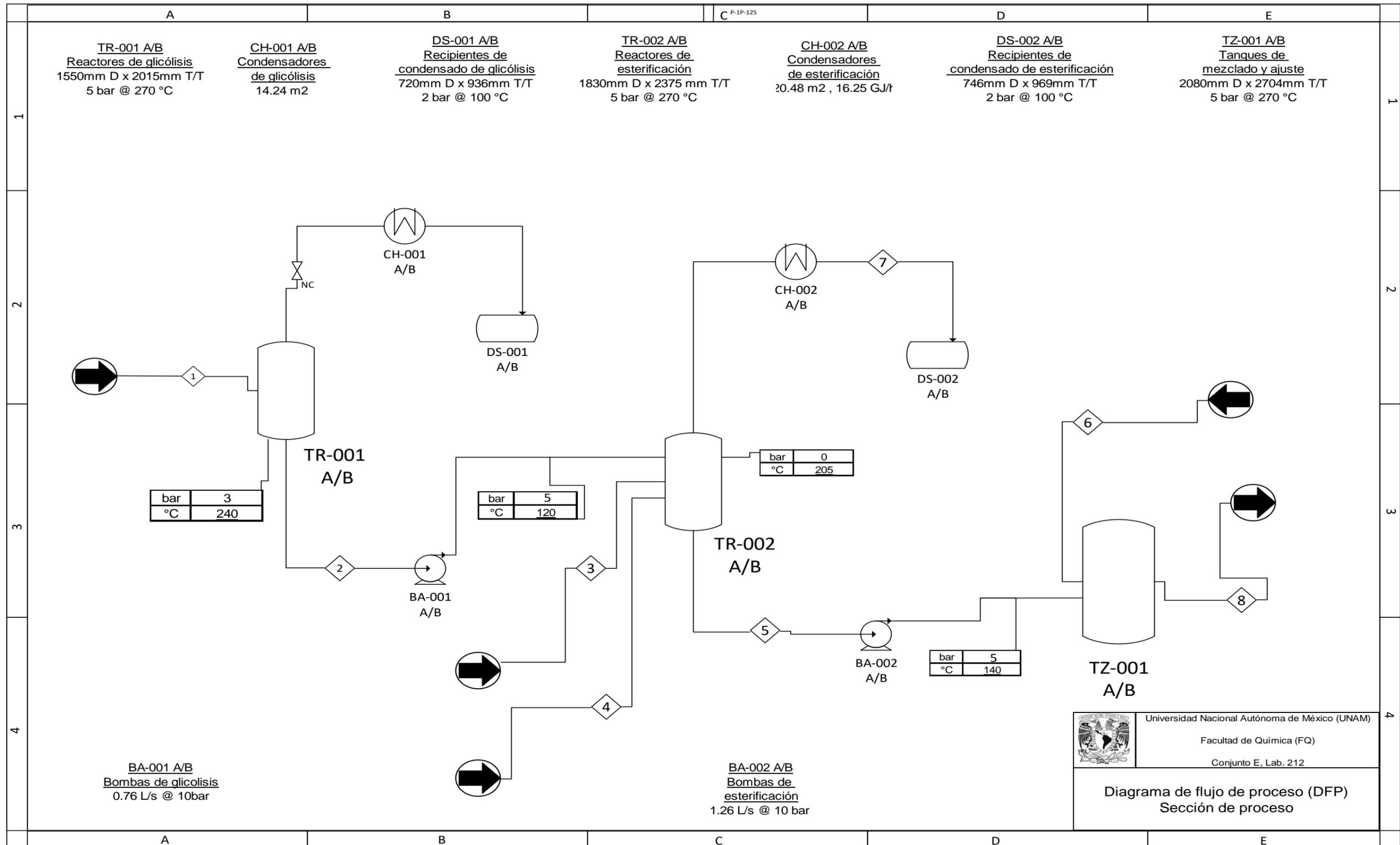
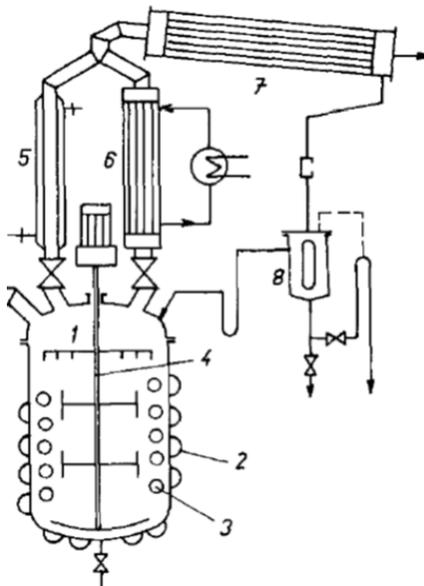


Figura 34. DFP para zona de reacción

Los reactores deben contar con una chaqueta de media caña para calentar y un serpentín en el interior para poder enfriar, la figura 35 muestra el arreglo tipo para los reactores de glicólisis y de esterificación.



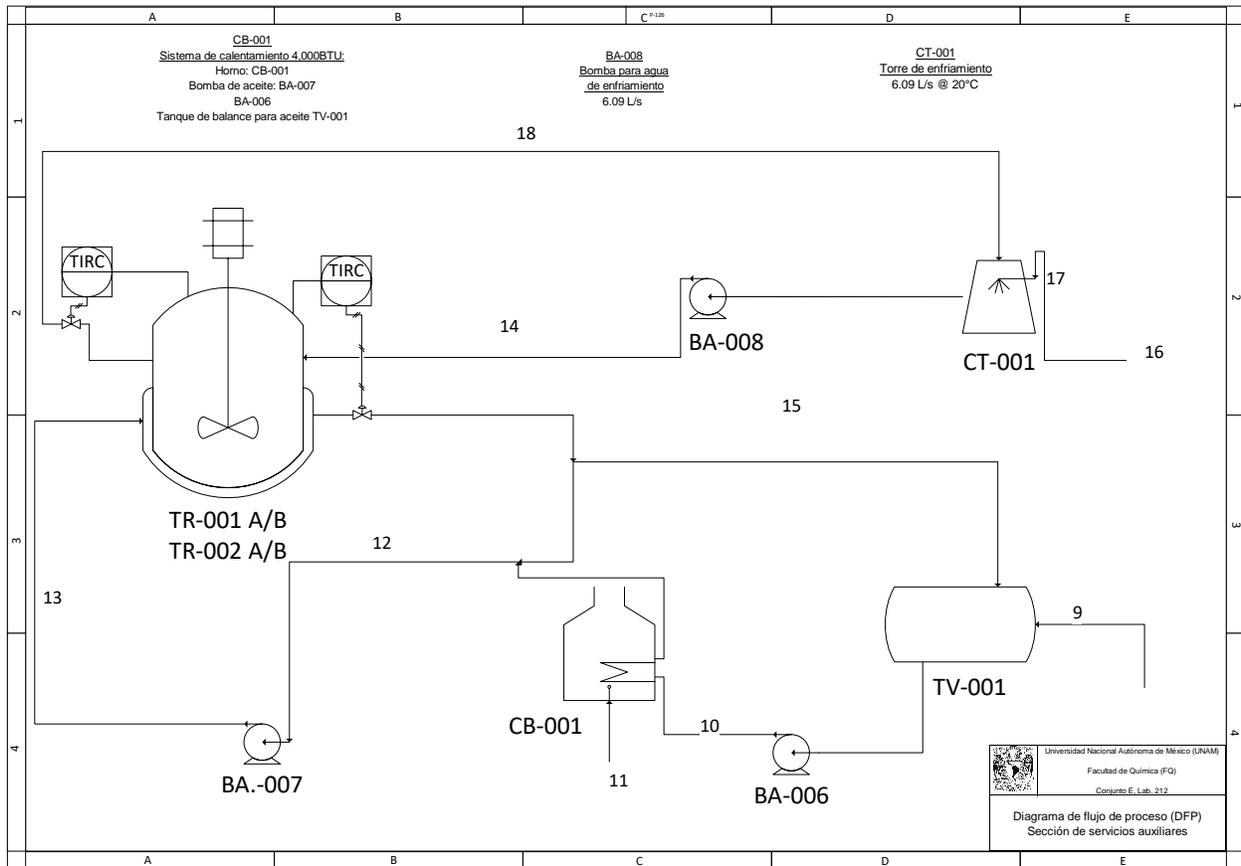
1, Reactor; 2, chaqueta para calentamiento (media caña); 3, serpentín de enfriamiento; 4, agitador; 5, Tubería enchaquetada para vapor; 6, destilador parcial (para método azeotrópico); 7, condensador y 8, tanque de condensados.

**Figura 35. Diseño típico de reactor Batch para plantas RPI.**

El siguiente DFP (figura 36) muestra un arreglo simplificado del sistema de calentamiento y enfriamiento que aplican para los reactores R-001 y R-002. La tabla 31 es la lista de equipo de la sección de servicios de calentamiento y enfriamiento.

**Tabla 31. Lista de equipo, zona de servicios auxiliares**

Nombre de equipo	Clave	Cantidad
Bomba para agua de enfriamiento	BA-008	1
Sistema de calentamiento: Horno Bomba de aceite Tanque de balance para aceite Pre calentador de aire	CB-001	1
Torre de enfriamiento	CT-001	1

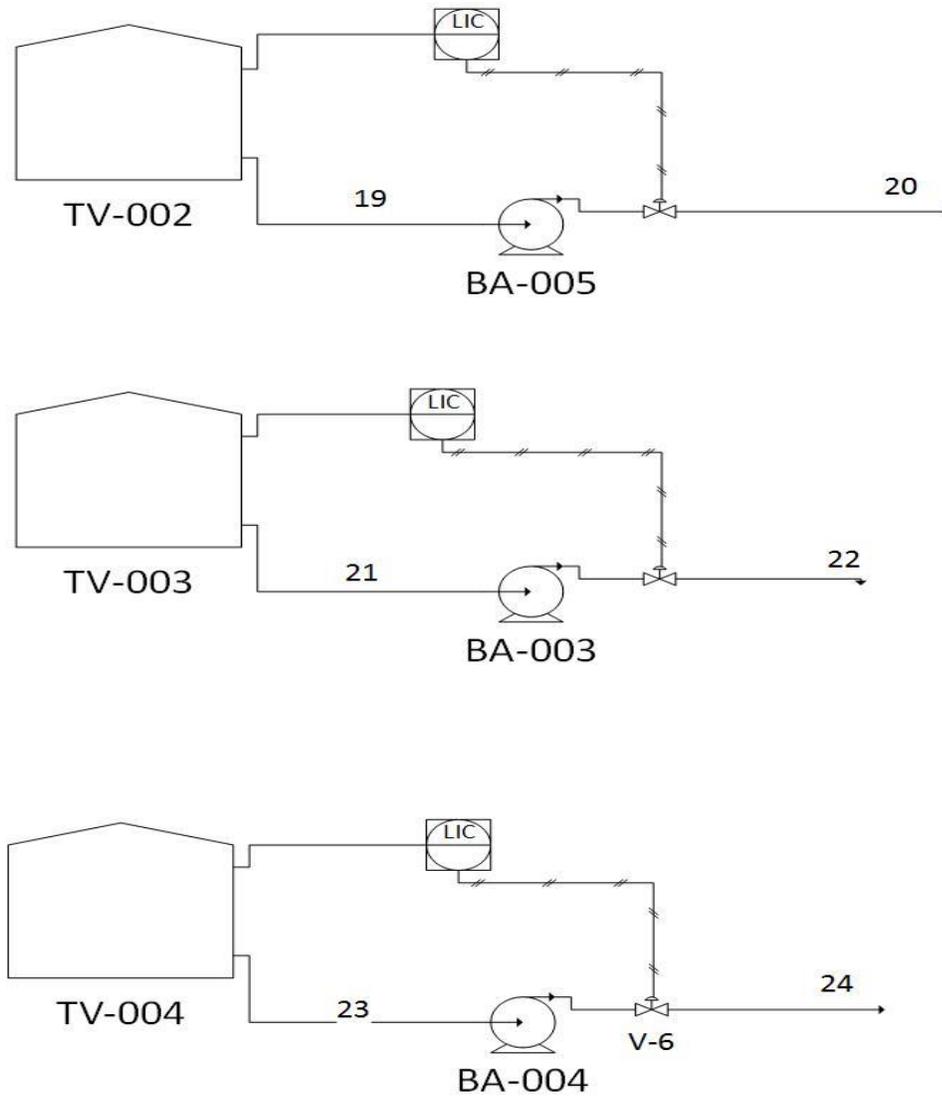


**Figura 36. DFP para zona de servicios auxiliares**

Además, se incluye un diagrama simplificado de los tanques de almacenamiento de MEG, MPG y estireno (figura 37) con la lista de equipo correspondiente a la zona de almacenamiento (tabla 32).

**Tabla 32. Lista de equipo para la zona de almacenamiento de químicos**

Nombre de equipo	Clave	Cantidad
Tanque de estireno	TV-002	1
Tanque de MEG	TV-003	1
Tanque de MPG	TV-004	1
Bomba de MEG	BA-003	1
Bomba de MPG	BA-004	1
Bomba de estireno	BA-005	1



**Figura 37. DFP para la zona de almacenamiento de químicos**

Con todos los equipos especificados, se propuso el siguiente plano de planta.

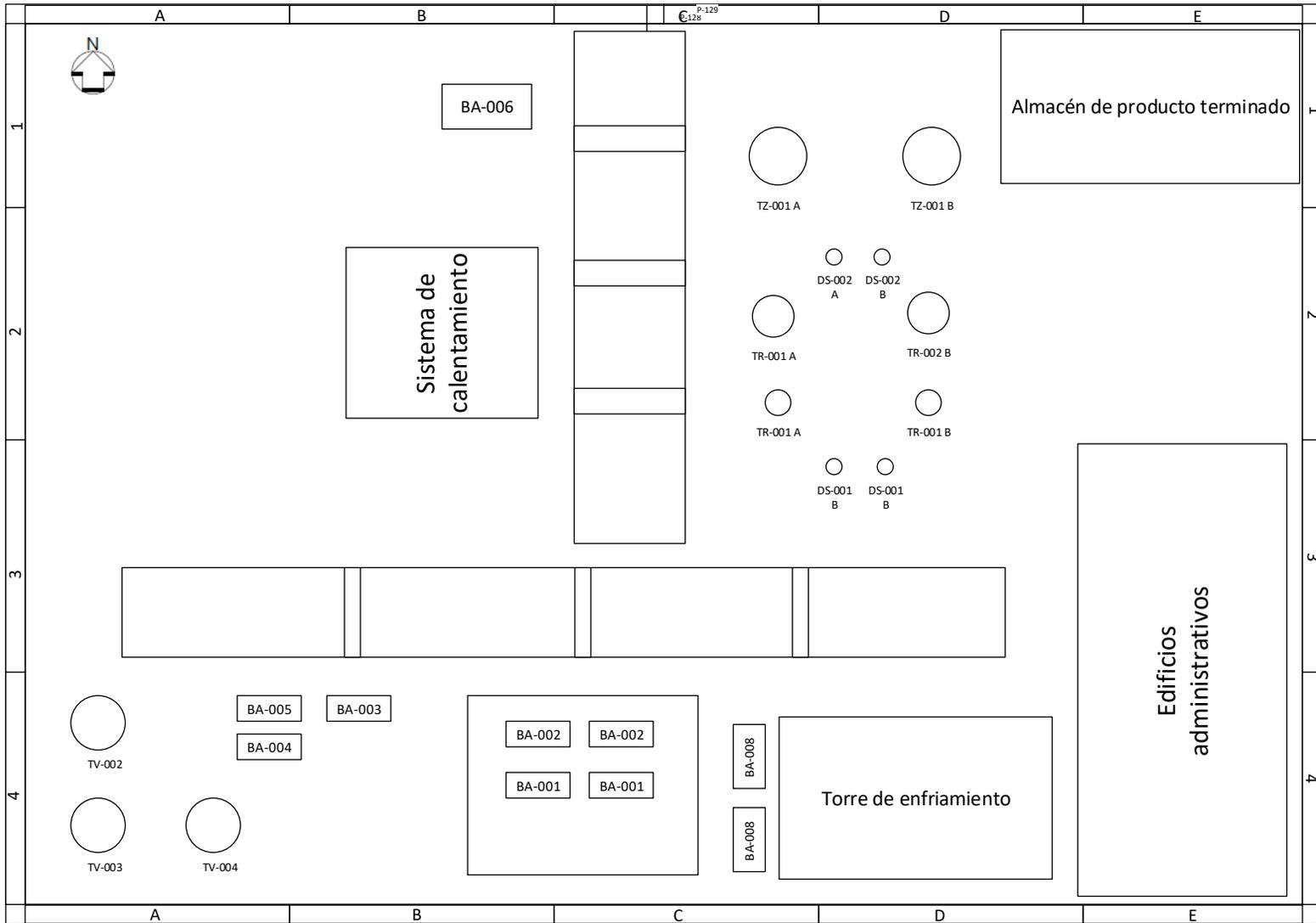


Figura 38. Plano de planta

### 3.5. Elaboración del balance de materia del proceso descrito

Se establece que el año operativo de la planta es de 8400 horas, con 15 días al final del año para mantenimiento, y que para producir un lote de resina se necesitan 20 horas. Entonces, para satisfacer la capacidad anual de la planta es necesario producir 14.3 toneladas de RPI en un lote, con un total de 420 lotes al año. La tabla 33 muestra la cantidad de materia prima para producir un lote de RPI.

**Tabla 33. Materia prima necesaria para un lote de RPI**

ID	ITEM	Carga (kg)
AM	Anhídrido maleico	3,765.7
AF	Anhídrido ftálico	1,063.35
PETr	PET reciclado	2,396.4
MPG	Monopropilenglicol	331.5
MEG	Monoetilenglicol	3,329.4
EST	Estireno	4,320
HQN	Hidroquinona	4.54
CAT	Acetato zinc	2.40
OCo	Octoato de cobalto	25.2

Retomando el DFP para la zona de reacción (figura 34), se muestra en la tabla 34 el balance de materia de acuerdo a la numeración de corrientes y con base a un lote de producción.

**Tabla 34. Balance de materia para la zona de reacción**

	Corrientes							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujo másico (kg/lote)	6,057.3	6,057.3	4,829.1		10,079.9	4,349.7	806.4	14,429.6
	fracción masa							
PET	0.396	-	-	-	-	-	-	-
MEG	0.550	-	-	-	-	-	-	-
MPG	0.055	-	-	-	-	-	-	-
AM	-	-	0.780	-	-	-	-	-
AF	-	-	0.220	-	-	-	-	-
EST	-	-	-	-	-	0.993	-	0.299
N2	-	-	-	1.000	-	-	-	-
H2O	-	-	-	-	-	-	1.000	-
HQN	-	-	-	-	-	0.001	-	-
OCo	-	-	-	-	-	0.006	-	-

Los requerimientos energéticos de calentamiento para el proceso de producción se definen a través de un factor energético típico de plantas de este tipo (ANIQ, 2016); de acuerdo a lo consultado, se encontró que una planta productora de resinas gasta alrededor de 0.16 \$MXN de gas natural para producir 1 kg de material.

Si se toma en cuenta que el precio promedio del gas natural para el sector industrial en lo que va del 2017, es de 103.343 \$MXN/GJ, se puede establecer la cantidad de gas natural y fluido térmico, necesarios para producir un lote de resina con las siguientes condiciones:

- La eficiencia de transferencia de calor del fluido térmico y los fluidos de proceso es del 80%
- La eficiencia de transferencia de calor entre el el gas natrual y el fluido térmico es del 80%
- El calor específico del fluido térmico es de 2.449 kJ/kg con una densidad de 887.20 kg/m<sup>3</sup>
- El gas natural tiene un poder calorifico medio de 0.03651 GJ/m<sup>3</sup>, con una densiad de 0.7461 kg/m<sup>3</sup> (Guzman, 2016)

Además, de acuerdo con Guzman (2016), para producir 1 kg de resina poliéster insaturada se requieren 636 kJ/kg como energía de enfriamiento. Para este servicio se considera agua como fluido de enfriamiento, disponible a 15 °C. Además, se considera que a esta temperatura y 1 bar, el calor específico del agua es de 4.189 kJ/kg °C y su densidad es de 999.10 kg/m<sup>3</sup>. La tabla 35 muestra los requerimientos energéticos, con base un lote de producción.

**Tabla 35. Requerimientos de enfriamiento y calentamiento, para un lote de resina**

Requerimiento de calentamiento, base un lote de RPI (14,429 kg)		
Concepto	Cantidad	Unidad
Base	0.16	\$/kg
Energía requerida de gas natural	23.34	GJ
Energía del proceso	14.30	GJ
Cantidad de aceite térmico	8.2	m <sup>3</sup>
Cantidad de gas natural	611.9	m <sup>3</sup>
Requerimiento de enfriamiento, base un lote de RPI (14,429 kg)		
Base	636.0	kJ/kg
Requerimiento de agua de enfriamiento	9,176.8	GJ
Requerimiento de agua	219.3	m <sup>3</sup>

### 3.6. *Evaluación económica (VPN, TIR, TR) del proceso*

Como lo define Torres (2016), la inversión total de capital para un proyecto, ITC, está compuesta por dos grandes componentes: la inversión fija de capital (IFC) y el capital de trabajo (CT). La IFC se refiere a los montos directos e indirectos relacionados con el equipo de proceso, mientras que el CT es el monto necesario de consumibles necesarios para la operación de la planta en los primeros meses de arranque, ver figura 39.

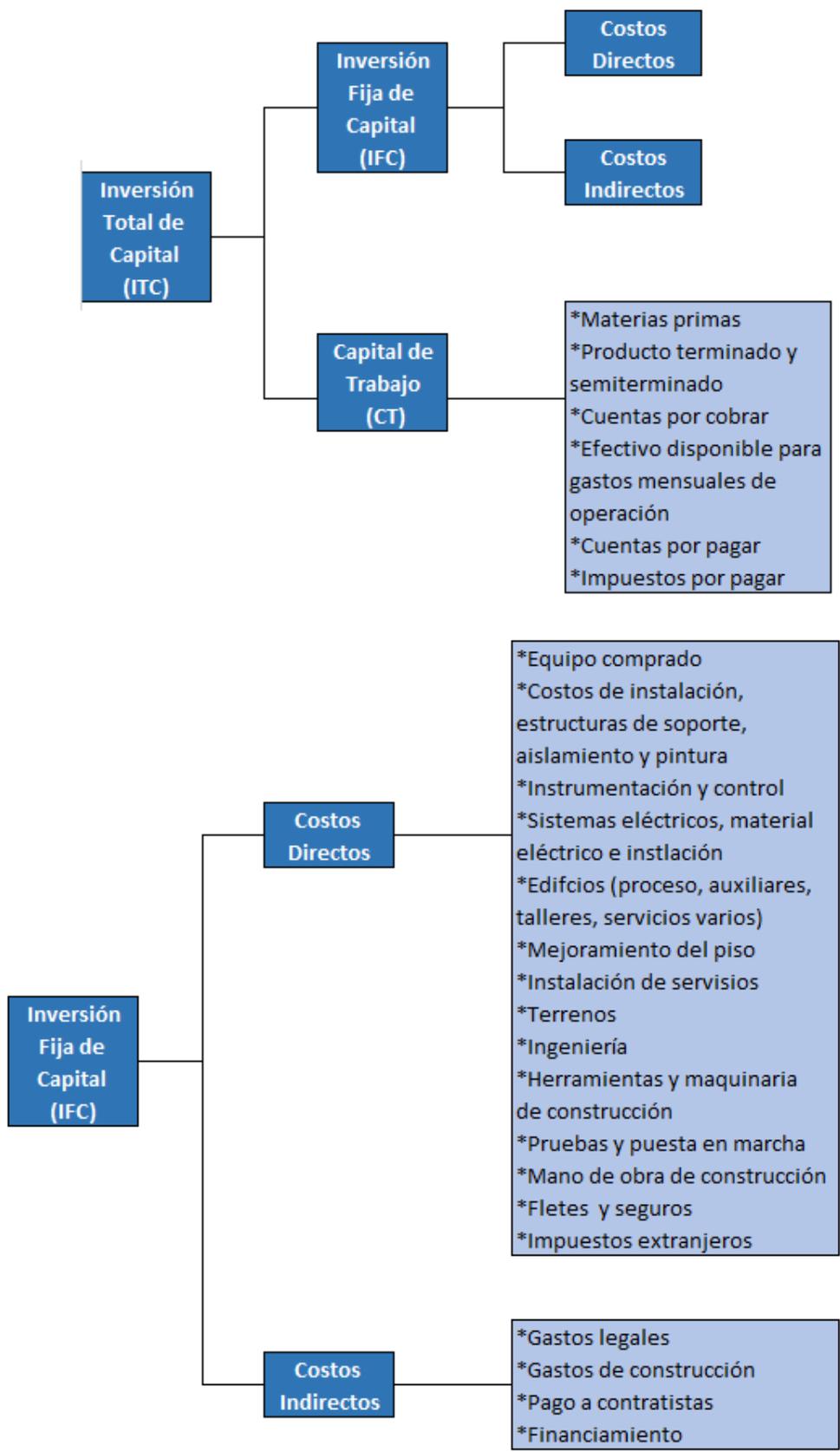


Figura 39. Componentes de Inversión total de capital para un proyecto, fuente (Torres Torres, 2016)

Para conocer el monto de cada componente del ITC, se realizaron los siguientes cálculos por separado.

- Determinación del costo de la planta, IFC
- Evaluación económica de la formulación
- Evaluación de indicadores de inversión con el método de flujos descontados

### *3.6.1. Determinación del costo de la planta*

El monto de inversión se calculó con la ayuda del software Aspen Capital Cost Estimator (ACCE); este programa contiene bases de datos sobre diseño, costos, métodos y modelos, las cuales usa para hacer diseños preliminares y simular procedimientos de costos para así obtener el estimado de costos de proyectos de ingeniería-procura-construcción (IPC). Para ello, es necesario alimentar al programa información sobre el equipo de proceso, esta información le permite a ACCE suponer o estimar información para completar el estimado, como puede ser; tubería e instrumentación, instalaciones y requerimientos eléctricos, obra civil, aislamiento térmico, pintura, mano de obra, salarios, etc.

Para especificar los equipos de proceso de las tablas 30, 31 y 32, se pre-diseñaron de acuerdo al anexo 1, en este anexo también se incluyen las especificaciones de los equipos de acuerdo a lo que se alimentó al software, a manera de hojas de datos.

Debido a que está especificación se hizo con información de etapas entre ingeniería conceptual e ingeniería básica, el nivel de precisión del estimado de este trabajo se considera de clase IV, de acuerdo a la clasificación de PEMEX, con un error  $-20\% + 35\%$  en el resultado del estimado de costos y de los indicadores de inversión, figuras 40 y 41.

Clasificación Estándar ACCE	Estándar ANSI Z94.0	Asociación de Ingenieros de Costos (UK)	ASPEN TECH	Lineamientos PEMEX
Clase 5 Bajo: -20 a -50% Alto: +30 a +100%	Orden de Magnitud Estimado -30% / +50%	Orden de Magnitud Clase IV -30% / +30%	Orden de Magnitud Estimado -30% / +50%	Clase V -30% / +50%
Clase 4 Bajo: -15 a -30% Alto: +20 a +50%	Presupuesto Estimado -15% / +30%	Estimado de Estudio Clase III -20% / +20%	Estimado Preliminar -25% / +35%	Clase IV -20% / +35%
Clase 3 Bajo: -10 a -20% Alto: +10 a +30%		Presupuesto Estimado Clase II -10% / +10%	Presupuesto Estimado -20% / +20%	Clase III -15% / +25%
Clase 2 Bajo: -5 a -15% Alto: +5 a +20%	Estimado Definitivo -5% / +15%	Estimado Definitivo Clase I -5% / +5%	Estimado de Control -10% / +10%	Clase II -10% / +15%
Clase 1 Bajo: -3 a -10% Alto: +3 a +15%			Estimado Definitivo 0% / +10%	Clase I -5% / +10%

Figura 40. Clasificación de estimados de costos.



Figura 41. Actividades para cada etapa del estimado de costos

La cantidad de inversión que obtuvo ACCE, con base en el pre diseño de los equipos para la planta de 6,000 ton/año de RPI se especifica en la tabla 36, (el reporte completo obtenido del software de ACCE se encuentra en el anexo 2 y los DTI de los equipos en el anexo 3).

**Tabla 36. Resumen de costos de inversión**

<b>Resumen del costo del proyecto (dólares)</b>						
Concepto	H-H	Salario	Costo de mano de obra	Costo de material	Costo total	Costo %
(2) Equipo	589	31.29	18,430	1,812,674	1,831,104	30.34
(3) Tubería	13,551	30.71	416,152	443,039	859,191	14.23
(4) Obra Civil	2,804	24.3	68,138	50,872	119,010	1.97
(5) Aceros especiales	108	28.81	3,106	18,828	21,935	0.36
(6) Instrumentación	15,275	31.25	477,401	1,351,124	1,828,526	30.29
(7) Instalación eléctrica	4,803	30.11	144,630	753,408	898,037	14.88
(8) Aislamiento	5,725	23.32	133,518	162,038	295,557	4.90
(9) Pintura	1,924	22.97	44,197	17,433	61,630	1.02
(10) Renta de equipo					121,100	2.01
<b>Costo total de equipo</b>	<b>44,779</b>		<b>1,305,572</b>	<b>4,609,417</b>	<b>6,036,089</b>	<b>100.00</b>
(11) Fletes					181,083	3.00
(12) Impuestos y permisos					60,361	1.00
(13) Ingeniería	21,579				863,160	14.30
(14) Pruebas y puesta en marcha					181,083	3.00
<b>Costos directos totales</b>	<b>66,358</b>				<b>7,321,776</b>	<b>121.30</b>
<b>Costos indirectos</b>	<b>7,607</b>				<b>1,575,200</b>	<b>26.10</b>
Contingencia					2,193,606	36.34
Escalación					387,887	6.43
<b>Costo total del proyecto</b>					<b>11,478,469</b>	<b>190.16</b>

Si el costo total del proyecto lo pasamos a moneda nacional con el tipo de cambio al final de abril 2017, \$18.8768 (BANAMEX, 2017), entonces el monto de inversión asciende a 216,676,766 MXN, con un acercamiento de -20% + 35% de acuerdo al estimado clase IV.

### 3.6.2. Evaluación económica de la formulación

La evaluación económica de la formulación se realizó con la tabla 37 de costos de materia prima, para obtener cada costo se consultó con proveedores y con la base de datos de la página web, <https://spanish.alibaba.com/>

**Tabla 37. Tabla de costos de materia prima**

ID	ITEM	\$(MXN)/kg
AM	Anhídrido maleico	\$24.98
AF	Anhídrido ftálico	\$22.20
PETR	PET reciclado	\$11.00
MEG	Monoetilenglicol	\$19.00
MPG	Monopropilenglicol	\$37.00
EST	Estireno	\$24.98
HQN	Hidroquinona	\$129.50
CAT	Acetato de zinc	\$370.00
OCo	Octoato de cobalto	\$21.65

Con el balance de materia de la tabla 33, se obtiene el siguiente resultado (tabla 38) para el costo total y unitario, con base en un lote de producción.

**Tabla 38. Costo total y unitario de la formulación base**

ID	ITEM	Cantidad kg	\$(MXN)/kg	Costo \$ MXN
AM	Anhídrido maleico	3,765.69	\$24.98	\$94,048.21
AF	Anhídrido ftálico	1,063.35	\$22.20	\$23,606.36
PETr	PET reciclado	2,396.44	\$11.00	\$26,360.79
MEG	Monoetilenglicol	3,329.44	\$19.00	\$63,259.27
MPG	Monopropilenglicol	331.52	\$37.00	\$12,266.34
EST	Estireno	4,320.00	\$24.98	\$107,892.09
HQN	Hidroquinona	4.54	\$129.50	\$587.41
CAT	Acetato zinc	2.40	\$370.00	\$886.68
Oco	Octoato de cobalto	25.20	\$21.65	\$545.45
			Costo \$(MXN)	\$329,452.61
RPI	Resina	14400.00	\$(MXN)/kg	\$22.88

### 3.6.3. Evaluación de indicadores de inversión con el método de flujos descontados

Con toda la información generada en los pasos anteriores se procedió a calcular el monto de inversión y después los indicadores de inversión por el método de flujo de efectivo descontado.

En primer lugar la inversión total de capital se compone del costo de la planta, calculado con el programa ACCE, y del capital de trabajo para el primer trimestre de operación; es decir, materia prima, costos energéticos, mano de obra y costos misceláneos. En la tabla 39 se muestra el monto total para la ITC.

**Tabla 39. Monto de la inversión total de capital**

En un trimestre se producen 36 lotes, cada uno de 14,429.7 kg de resina, por lo que en un trimestre se producen 519,470.5 kg de RPI.		
Inversión total de capital del proyecto (ITC)	\$228,831,551	100.00 %
Inversión fija de capital (IFC)	\$216,676,766	94.69 %
Capital de trabajo para el primer trimestre de operación (CT)	\$12,154,786	5.31 %
Materia prima	\$11,843,927	5.18 %
Energéticos	\$162,148	0.07 %
Sueldos y salarios	\$74,356	0.03 %
Misceláneos	\$74,356	0.03 %

Con el monto de inversión total de capital, el costo unitario de materia prima, el balance de materia y el balance energético se prosiguió a plantear un flujo de dinero a través del tiempo que sirvió para conocer el valor presente neto, la tasa interna de retorno y el tiempo de retorno de la inversión para la planta de RPI que se propone en este trabajo. Además en el anexo 4, se muestra la tabla de flujo de efectivo descontado.

Para el cálculo de flujos de efectivos descontados, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La construcción de la planta se realiza en dos años
- Costo de energía eléctrica 0.15 \$MXN/kg de resina
- Costo de gas natural 0.16 \$MXN/kg de resina
- Precio de venta de resina, 32 \$MXN/kg de resina
- Costo de mano de obra, con base a la información de sueldos y salarios para el sector de resinas sintéticas del INEGI (2015), de 0.14 \$MXN/kg de resina

- Tasa de descuento de 6.64 % (tasa de interés interbancaria de equilibrio promedio en lo que va del 2017)
- El cálculo de VPN y TIR se realizó a 17 años después del primer año de operación

Los resultados para los indicadores de inversión se muestran en la tabla 40.

**Tabla 40. Indicadores de inversión para la planta de RPI**

Inversión total de capital del proyecto (ITC)	\$228,831,551
Producción anual de RPI (toneladas)	6,000
Costos corrientes anuales	\$127,451,232
Valor de ventas anuales	\$192,000,000
Valor presente neto	\$211,073,487
Tasa interna de retorno	15.74%
Tiempo de recuperación de la inversión	5 años

Como se puede observar, el VPN es positivo con un valor de poco más de 210 millones de pesos y el TIR alcanza un valor de 15.7%. Además, el tiempo de recuperación de la inversión sería de 5 años, contando a partir del primer año de operación de la planta. En la figura 42 se muestra el comportamiento de esta inversión a través del tiempo.

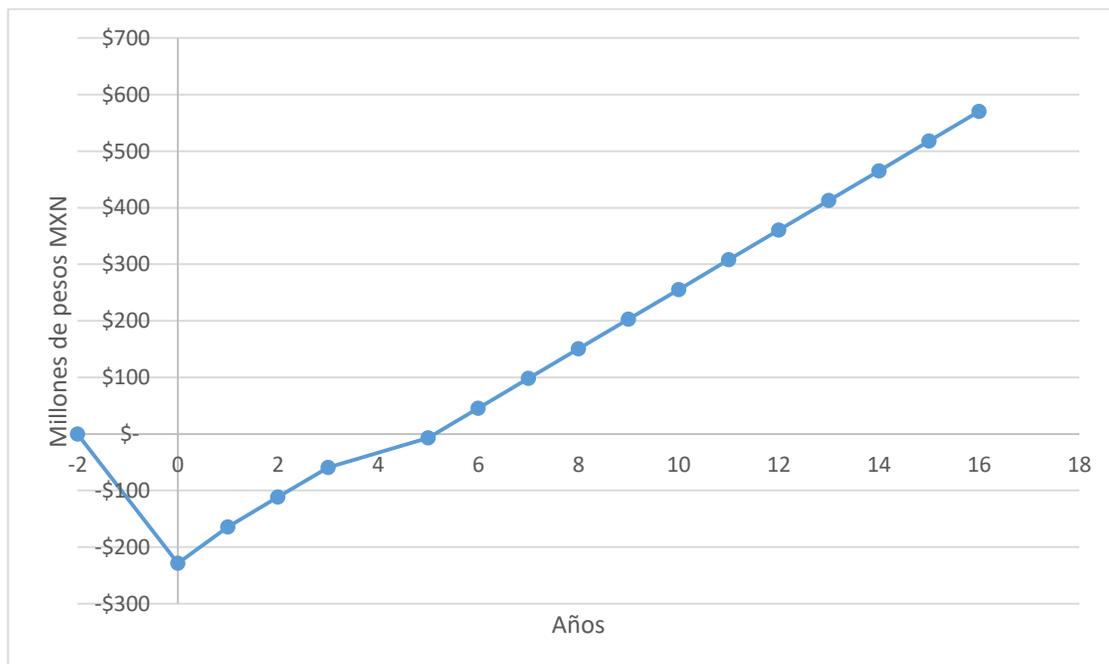


Figura 42. Gráfica de efectivo acumulado

También se realizó un estudio de sensibilidad para los indicadores de inversión, en donde se toman en cuenta casos como; aumento en el costo de materias primas, aumento en el precio de venta, disminución en el costo de producción y aumento en la capacidad de producción, los resultados se muestran en la figura #.

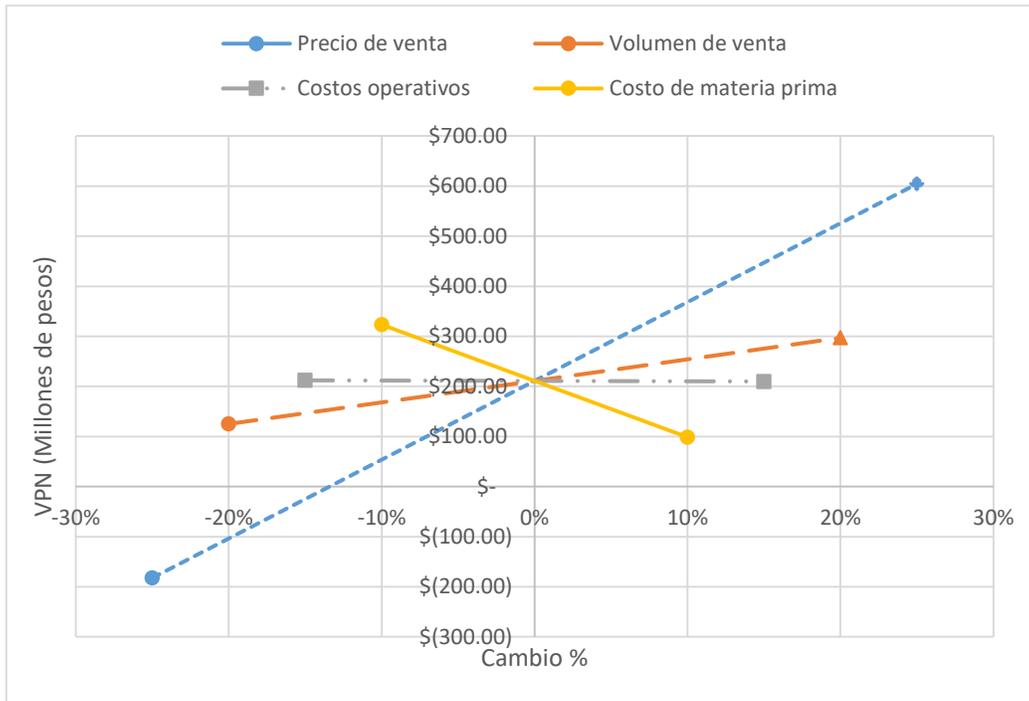


Figura 43. Análisis de sensibilidad

Como se aprecia en la figura 43, el aumento en el precio de venta de las RPI tiene mayor impacto positivo en el valor presente neto en comparación con el aumento en la capacidad de producción. Por otro lado, el costo de la materia prima afecta en mayor medida el desempeño de este proyecto que el aumento en el costo operacional. También podemos decir que al aumentar el costo de las materias primas y del precio de venta, tiene mayor efecto positivo el aumento del precio de venta.

### 3.6.4. Análisis de riesgo

De acuerdo a la clasificación de riesgos tipo RBS, ver figura 42, podemos identificar los siguientes riesgos asociados a este proyecto.

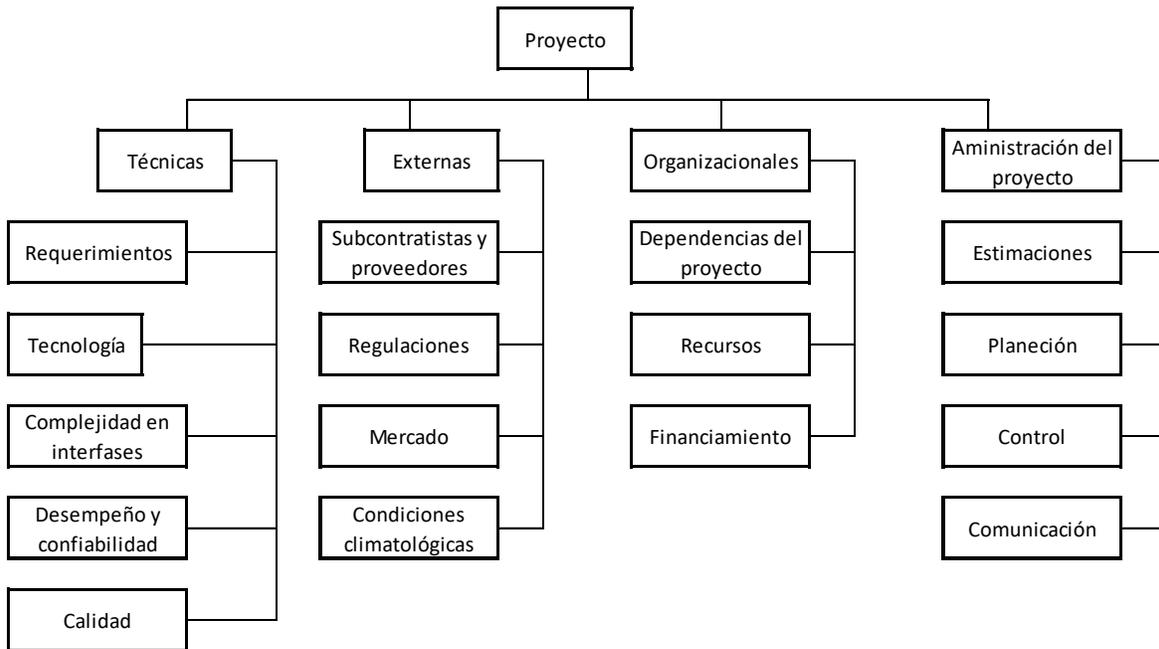


Figura 44. Clasificación de riesgos RBS

Técnicas de operación. Falta de experiencia
El proceso de mezclado del poliéster con estireno es el paso más crítico de la producción, ha habido casos reportados en los que una mala operación provoca un gelado en los reactores, lo que provoca pérdida de materia prima y daño al equipo de producción.
Técnicas de diseño
El diseño considera una etapa previa de glicolisis, pero esta etapa podría evitarse y solo considerar los reactores de esterificación y los de mezclado, esto podría ayudar a reducir la inversión y aumentar los indicadores de inversión.
Técnica
Información incompleta. Las bases de diseño en el diseño fueron estimadas o consultadas en bibliografía, se necesita mayor definición de éstas para precisar el diseño de algunos equipos como son la capacidad de la torre de enfriamiento y la potencia de las bombas.
Organizacional
El proyecto se consideró sin tener conocimiento del terreno y el acceso a créditos financieros, por lo que el monto de inversión está incompleto al no contar con este rubro.

Organizacional y administración del proyecto

El diseño propuesto en esta tesis no fue realizado por un equipo de trabajo la experiencia en el diseño de estas plantas y en su manejo, para un mejor diseño deben ser consultados expertos desde el principio para poder limitar mejor el alcance del proyecto y las bases

Externo de mercado

La incorporación al mercado actual podría tener dificultades ya que hay empresas con mayores capacidades y con mayor experiencia.

## Conclusiones

Se realizó la evaluación económica de una planta de resinas poliéster insaturadas; con una capacidad de 6,000 toneladas anuales y que opera 8,400 horas al año, obteniendo un VPN de más de 100 millones de pesos mexicanos, con una TIR de 13.9% y un tiempo de recuperación de la inversión de 7 años. Estos indicadores se le mostraron a un experto en finanzas que ha trabajado en una empresa que fabrica RPI como uno de sus productos; de acuerdo a su opinión la tasa de descuento utilizada para el cálculo del VPN es muy baja, también consideró que el plazo de 18 años es muy largo y tendría que ampliarse si es que se usa una tasa de descuento mayor, por último la TIR no da el valor requerido de 1.1 veces la tasa de descuento lo que hace al proyecto desfavorable.

Con la capacidad propuesta para este trabajo representa el 8.7% de la demanda de resinas poliéster insaturadas del 2015. Si la demanda nacional siguiera un comportamiento lineal, a partir de los datos de la tabla 16, una planta química de esta capacidad cubriría el 6.3% de la demanda de RPI para el 2021.

El diseño que se propuso para la planta productora de RPI consta de: 2 reactores de glicólisis, 2 reactores de esterificación, 2 tanques de ajuste, un sistema de calentamiento con aceite térmico, 6 bombas de proceso y 3 tanques de almacenamiento de químicos.

Con el diseño propuesto se obtuvo una inversión de 238,568,059 MXN, de acuerdo a la estimación del programa Aspen Capital Cost Estimator más una cotización para el sistema de calentamiento.

La formulación base del diseño de la planta, logró incluir PET en la estructura química de la resina, si se toma en cuenta la capacidad anual de la planta (6,000 toneladas), se podrían reciclar hasta 1010 toneladas de PET de post-consumo en un año operativo, lo que representa un 0.14% del PET consumido en el 2015.

Se logró que la resina con la formulación desarrollada tuviera propiedades de tensión superiores en comparación con resinas orto-ftálicas comerciales, con un valor de 52 MPa de resistencia a la tensión, superando por 3.5 MPa a la mejor resina comercial.

La formulación que permite un alto desempeño de tensión, contiene 37% mol de anhídrido maleico, además de incluir una mezcla de glicoles que permite mayor compatibilidad con estireno.

EL aumento de contenido de anhídrido maleico, así como el uso de monopropilenglicol en la formulación de la resina, provoca que el costo de la resina se eleve; sin embargo, al incluir el PET de desecho glicolizado en la formulación se logra un costo de 22.80 \$MXN/kg de resina.

Gracias al trabajo en conjunto con Alcocer Márquez, se realizó un artículo de investigación con el título: Resinas poliéster insaturadas a partir de PET de desecho glicolizado; síntesis y caracterización, este artículo ya fue aceptado y espera ser publicado en la Revista Mexicana de Ingeniería Química

## Bibliografía

- Abdel-Azim A., A.-A. (1996). Unsaturated Polyester Resins From Poly(Ethylene Terephthalate) Waste for Polymer Concrete. *Polymer engineering and science*, 36(24), 2973-2977. doi:10.1002@pen.10699
- Alcocer Márquez, L. F. (2015). *Preparación de membranas poliméricas a partir de reacciones de acoplamiento entre diaminas y aldehídos*. Trabajo de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Alcocer Márquez, L. F. (2017). *Estudio y valoración del reciclaje químico del poli-(tereftalato de etileno), PET*. Tesis de maestría inédita, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- ANIQ. (2016). *Asociación Nacional de la Industria Química*. Recuperado el 2017, de Anuario estadístico: <http://www.aniq.org.mx/anuario/2016/index.asp>
- Askeland, D. R. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (4 ed.). México: Thomson.
- Aslan, S., Immirzi, B., Laurienzo, P., Malinconico, M., Martuscelli, E., Volpe, M. G., . . . Savini, L. (1997). Unsaturated polyester resins from glycolysed waste polyethyleneterephthalate: synthesis and comparison of properties and performance with virgin resin. *Journal of materials science*, 32, 2329-2336. doi:10.1023@a-1018584519173
- BANAMEX. (2017). [www.banamex.com](http://www.banamex.com). Obtenido de Histórico dólar americano: [https://www.banamex.com/economia\\_finanzas/es/divisas\\_metales/dolar\\_interbancario.htm](https://www.banamex.com/economia_finanzas/es/divisas_metales/dolar_interbancario.htm)
- Boenig, V. H. (1964). *Unsaturated polyesters: structure and properties*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (Septima Edición ed.). Gran Bretaña: Butterworth Heinemann.
- Carlston, E. F., Johnson, G. B., Lum, F. G., Huggins, D. G., y Park, K. T. (1959). Isophthalic Acid in Unsaturated Polyesters. *Industrial and engineering chemistry*, 51(3), 253-256.
- Davies, P. (2012). *Unsaturated Polyester Resins & Intermediates*. Presentación de seminario. Obtenido de [http://www.orbichem.com/userfiles/KICHEM%202012/KICHEM2012\\_9\\_UPR\\_PD.pdf](http://www.orbichem.com/userfiles/KICHEM%202012/KICHEM2012_9_UPR_PD.pdf)
- Duque-Ingunza, I., López-Fonseca, R., de Rivas, B., y Gutiérrez-Ortiz, J. I. (2013). Synthesis of unsaturated polyester resin from glycolysed postconsumer PET wastes. *Mater Cycles Waste Manag*(15), 256–263. doi:10.1007/s10163-013-0117-x

- ECOCE. (2015). *Informe 2015 ECOCE*. México .
- Gladiola, V. M. (2015). *Metodología a nivel laboratorio para la obtención de una resina poliéster instaturada con alto contenido biobasada*. Trabajo de grado, Instituto Tecnológico Superior de Centla, Tabasco.
- Global Market Insights. (2016). *Unsaturated Polyester Resins (UPR) Market Size*. Recuperado el 2017, de [www.gminsights.com](http://www.gminsights.com): <https://www.gminsights.com/industry-analysis/unsaturated-polyester-resin-upr-market-report>
- Goodman, S. H. (1998). *Handbook of thermoset plastics*. Westwood, New Jersey: Noyes publications.
- Guzman Gómez, A. J. (2016). *Diagnóstico del aprovechamiento de energía térmica en una instalación industrial. Caso práctico: una planta de resinas y plastificantes*. UNAM. Ciudad de México: UNAM.
- Hansmann, H. (2003). Composites Polyester Resins . En T. Pepper, *ASM Handbook* (págs. 90-96). ASM Internationa.
- IHS Markit. (2016). *Polyester Resins, Unsaturated*. Recuperado el 2017, de [www.ihs.com](http://www.ihs.com): <https://www.ihs.com/products/unsaturated-polyester-resins-chemical-economics-handbook.html>
- INEGI. (2015). *La industria química en México 2014*. Serie estadística sectorial.
- Kandelbauer, A., & al, e. (2014). Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters. En *Handbook of Thermoset Plastics* (págs. 111-172). California : Elsevier Inc.
- Karayannidis, G. P., Achilias, D. S., Sideridou, I. D., & Bikiaris, D. N. (2005). Alkyd resins derived from glycolized waste. *European Polymer Journal*, *41*, 201–210. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004.10.001
- Kaska, L., y Leseck, F. (1991). Processes and equipment for alkyd and unsaturated polyester resin manufacture. *Progress in Organic Coatings*, *19*, 283-331. doi:0033-0655/91/\$3.50
- LU, M., y KIM, S. (2001). Unsaturated Polyester Resins Based on Recycled PET: Preparation and Curing Behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 1052-1057. doi:10.1002@app.1189
- Malik, M., yChoudhary, V. (2000). Current Status of Unsaturated Polyester Resins. *Journal of Macromolecular Science*, 139-165. doi:10.1081/MC-100100582
- Matynia, T., Gawdzik, B., y Osypiuk, J. (1998). Inhibitors in Curing of High Reactive Unsaturated Polyester Resin. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, *41*, 215-223. doi:10.1080/00914039808041046
- Novak, J. (1988). Inhibitors for unsaturated polyesters and varnishes prepared from them. *Progress in Organic Coatings*,, *16*, 231-253. doi:0033-0655/88/\$8.55
- Parker, E. E. (1954). Physical Properties of Polyester Resins. *Industrial and engineering chemistry*, *46*(8), 1615-1618.

- Parker, E. E. (1963). Inhibitors for unsaturated polyester resins. *I & EC Product research and development*, 2(2), 102.
- Parker, E. E. (1966). Unsaturated Polyesters. *Industrial and engineering chemistry*, 58(4), 53-58.
- Penczek, P., Czub, P., y Pielichowski, J. (2005). Unsaturated Polyester Resins: Chemistry and Technology. *Adv Polym Sci*, 1-95. doi:10.1007/b136243
- Pérez Bonilla, J. L. (2002). *Manual de seguridad e higiene para el manejo del anhídrido ftálico fundido utilizado en la producción de resina poliéster insaturada*. Trabajo de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
- Potiyara, P., Klubdee, K., y Limpiti, T. (2007). Physical Properties of Unsaturated Polyester Resin from Glycolized PET Fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 104, 2536-2541. doi:DOI 10.1002/app.25923
- PROFECO. (2006). [www.profeco.gob.mx](http://www.profeco.gob.mx). Obtenido de [http://www.profeco.gob.mx/revista/publicaciones/adelantos\\_06/enva\\_pet\\_jun06.pdf](http://www.profeco.gob.mx/revista/publicaciones/adelantos_06/enva_pet_jun06.pdf)
- Puangansuk, K., Opaprakasit, M., Udomkichdecha, W., y Potiyaraj, P. (2009). Effects of Saturated Acids on Physical Properties of UPE Resins. *Polym Environ*(17), 67-70. doi:10.1007/s10924-009-0122-2
- Ramis J., X. (1994). *ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE SISTEMAS QUÍMICOS*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Màquines i Motors Tèrmics.
- Ramis, X. (1995). Effect of the inhibitor on the curing of an unsaturated polyester resin. *Polymer*, 36(18), 3511-3521. doi:10.1016/0032-3861(95)92023-8
- Sistema de Información Enegetica: SENER. (2017). [sie.energia.gob.mx](http://sie.energia.gob.mx). Recuperado el mayo de 2015, de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveca=B133C04>
- Stevens, M. P. (1999). *Polymer chemistry* (Third edition. ed.). New York: Oxford University Press.
- Tahvildari, K., Mozafari, S., y Tarinsun, N. (2010). Chemical Recycling of Poly Ethylene Terphthalat to. *Appl. Chem. Res*(12), 59-68. doi:2008-3815 / 59
- Torres Torres, M. (2016). *Estimación de costos de inversión a nivel ingeniería conceptual para sistemas de tratamiento de agua utilizados en procesos de refinación de petróleo*. Ciudad de México: UNAM.
- Vaidya, U. R. (1987). Unsaturated Polyesters from PET Waste: Kinetics of Polycondensation. *Journal of Applied Polymer Science*, 235-245. doi:10.1002@app.1987.070340120
- Vaidya, U. R., y Nadkarni, V. M. (1988). Unsaturated Polyester Resins from Poly(ethylene terephthalate) Waste. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties? *Ind. Eng. Chem. Res*, 27, 2056-2060. doi:0888-5885/88/2627-2056\$01.50/0
- Vaidya, U. R., y Nadkarni, V. M. (1988). Unsaturated Polyester Resins from Poly(ethylene terephthalate) Waste: Mechanical and Dynamic Mechanical Properties. *Ind. Eng. Chem. Res*, 27(11), 2056-2060.



## ANEXO 1

Pre-diseño de equipos de proceso.

Reactores de glicólisis, esterificación y tanque de mezclado y ajuste.

$$V(TR - 001A) = \frac{6,057.4}{2} * \frac{1}{0.8} * \frac{1}{1000} [=] m^3$$

$$V(TR - 002A) = \frac{10,080}{2} * \frac{1}{0.8} * \frac{1}{1000} [=] m^3$$

$$V(TR - 001A) = \frac{14,429.7}{2} * \frac{1}{0.8} * \frac{1}{1000} [=] m^3$$

$$Vr = \frac{D^2}{4} * \pi * Hr$$

$$Hr = 1.3 * Dr$$

$$Pr = Vr(18.1076) - 0.3798^1$$

**Tabla 41. Especificaciones de reactores**

	Unidad	
Nombre		Reactores de glicólisis
TAG		TR-001 A/B
Cantidad		2
Tipo		BATCH
Material		Acero al carbón
Revestimiento		Acero inoxidable SS430
Diámetro	m	1.55
Distancia T-T	m	2.015
Presión diseño	Kpag	500
Presión de vacío de diseño	Kpag	29
Temperatura de diseño	°C	250
Tipo de chaqueta		media caña
Material de chaqueta		acero al carbón
Potencia de agitador	kW	69

<sup>1</sup> Correlaciones para el contenido total del reactor y sus elementos, (Kaska & Lesek, 1991)

	Unidad	
Nombre		Reactores de esterificación
TAG		TR-002 A/B
Cantidad		2
Tipo		BATCH
Material		Acero al carbón
Revestimiento		Acero inoxidable SS430
Diámetro	m	1.83
Distancia T-T	m	2.379
Presión diseño	Kpag	300
Presión de vacío de diseño	Kpag	29
Temperatura de diseño	°C	240
Tipo de chaqueta		media caña
Material de chaqueta		acero al carbón
Potencia de agitador	kW	113

	Unidad	
Nombre		Tanques de mezclado y ajuste
TAG		TZ-001 A/B
Cantidad		2
Tipo		BATCH
Material		Acero al carbón
Revestimiento		Acero inoxidable SS410
Diámetro	m	2.08
Distancia T-T	m	2.704
Presión diseño	Kpag	300
Presión de vacío de diseño	Kpag	29
Temperatura de diseño	°C	240
Tipo de chaqueta		media caña
Material de chaqueta		acero al carbón
Potencia de agitador	kW	146

## Condensadores de reactores

$$Ar = Vr(2.5394) + 4.5869^2$$

**Tabla 42. Especificaciones de condensadores para reactores**

Nombre		Condensador de R-001
TAG		CH-001 A/B
Cantidad		2
Área de transferencia	m2	14.24
	Unidad	
Nombre		Condensador de R-002
TAG		CH-002 A/B
Cantidad		2
Área de transferencia	m2	20.48

## Tanques de condensados

$$Vtc = Vr(0.0171) + 0.3165^3$$

$$Vr = \frac{D^2}{4} * \pi * Hr$$

$$Hr = 1.3 * Dr$$

**Tabla 43. Especificaciones para tanques de condensados**

	Unidad	
Nombre		Recipientes de condensado de glicólisis
TAG		DS-001 A/B
Cantidad		2
Material		Acero al carbón
Diámetro	m	0.72
Distancia T-T	m	0.936
Presión diseño	Kpag	100
	Unidad	
Nombre		Recipientes de condensado de esterificación
TAG		DS-002A/B

<sup>2</sup>Correlaciones para el contenido total del reactor y sus elementos, (Kaska & Lesek, 1991)

<sup>3</sup> Correlaciones para el contenido total del reactor y sus elementos, (Kaska & Lesek, 1991)

Cantidad		2
Material		Acero al carbón
Diámetro	m	0.746
Distancia T-T	m	0.969
Presión diseño	Kpag	100

## Bombas

$$Qb = \frac{\text{Masa en reactores}}{20 \text{ horas}} * \frac{1}{\rho}$$

$$hb = Hr + 2$$

$$Pb = \frac{Qb * hb * \rho}{6116 \times 10^3 * 0.85}$$

**Tabla 44. Especificaciones para bombas**

	Unidad				Unidad	
Nombre		Bombas de glicólisis		Nombre		Bombas esterificación
TAG		BA-001 A/B		TAG		BA-002 A/B
Cantidad		2		Cantidad		2
Material		SS304		Material		SS410
Flujo	L/S	0.76		Flujo	L/S	1.26
Cabeza		4.7		Cabeza		4.7
Nombre		Bomba de MEG		Nombre		Bomba de MPG
TAG		BA-003		TAG		BA-004
Cantidad		2		Cantidad		2
Material		SS304		Material		SS316
Flujo	L/S	0.83		Flujo	L/S	0.09
Cabeza		4.7		Cabeza		4.7
Nombre		Bomba de estireno		Nombre		Bomba de agua de enfriamiento
TAG		BA-005		TAG		BA-008
Cantidad		2		Cantidad		2
Material		Acero al carbón		Material		Acero al carbón
Flujo	L/S	1.33		Flujo	L/S	6.09
Cabeza		4.7		Cabeza		4.7

Tanques de almacenamiento

$$V(TV - 002) = \frac{\text{Cantidad de estireno}}{\rho} * 3$$

$$V(TV - 003) = \frac{\text{Cantidad de MPG}}{\rho} * 6$$

$$V(TV - 0012) = \frac{\text{Cantidad de MEG}}{\rho} * 3$$

**Tabla 45. Especificaciones de tanques de almacenamiento**

	Unidad	
Nombre		Tanque de estireno
TAG		TV-002
Cantidad		1
Volumen de liquido	m3	14
Material		Acero al carbón
Nombre		Tanque de MPG
TAG		TV-003
Cantidad		1
Volumen de liquido	m3	2
Material		Acero al carbón
Recubrimiento		SS316
Nombre		Tanque de MEG
TAG		TV-004
Cantidad		1
Volumen de liquido	m3	9
Material		Acero al carbón
Recubrimiento		SS304

Horno para aceite térmico y torre de enfriamiento

**Tabla 46. Especificaciones para caldera y horno**

Tag de equipo	Capacidad	Valor de cotización
CT-001	6.9 L/s	
CB-001:	4,000,000 BTU/h	1,151,000 MXN

Calentador de aceite	4,000,000 BTU/h	656,000 MXN
Tanque balance de aceite	1,170 L	
Bomba para aceite	20 HP, 60 m <sup>3</sup> /h	68,000 MXN
Pre calentador de aire		317,000 MXN
Instalación y arranque		110,000 MXN

## ANEXO 2

En este anexo se muestran los diagramas de tuberías e instrumentación (DTI), que propone el programa ACCE para los equipos de proceso, estos DTI forman parte de la base de datos del programa y los propone como típicos cuando se especifica el tipo de equipo.

A grandes rasgos los equipos que se especificaron fueron de 7 tipos; bombas, intercambiadores de calor (de tubos y coraza), tanques de almacenamiento, reactores agitados enchaquetados, recipientes verticales (para condensados), un horno y una torre de enfriamiento, este último fue el único que tiene un DTI propuesto por el programa

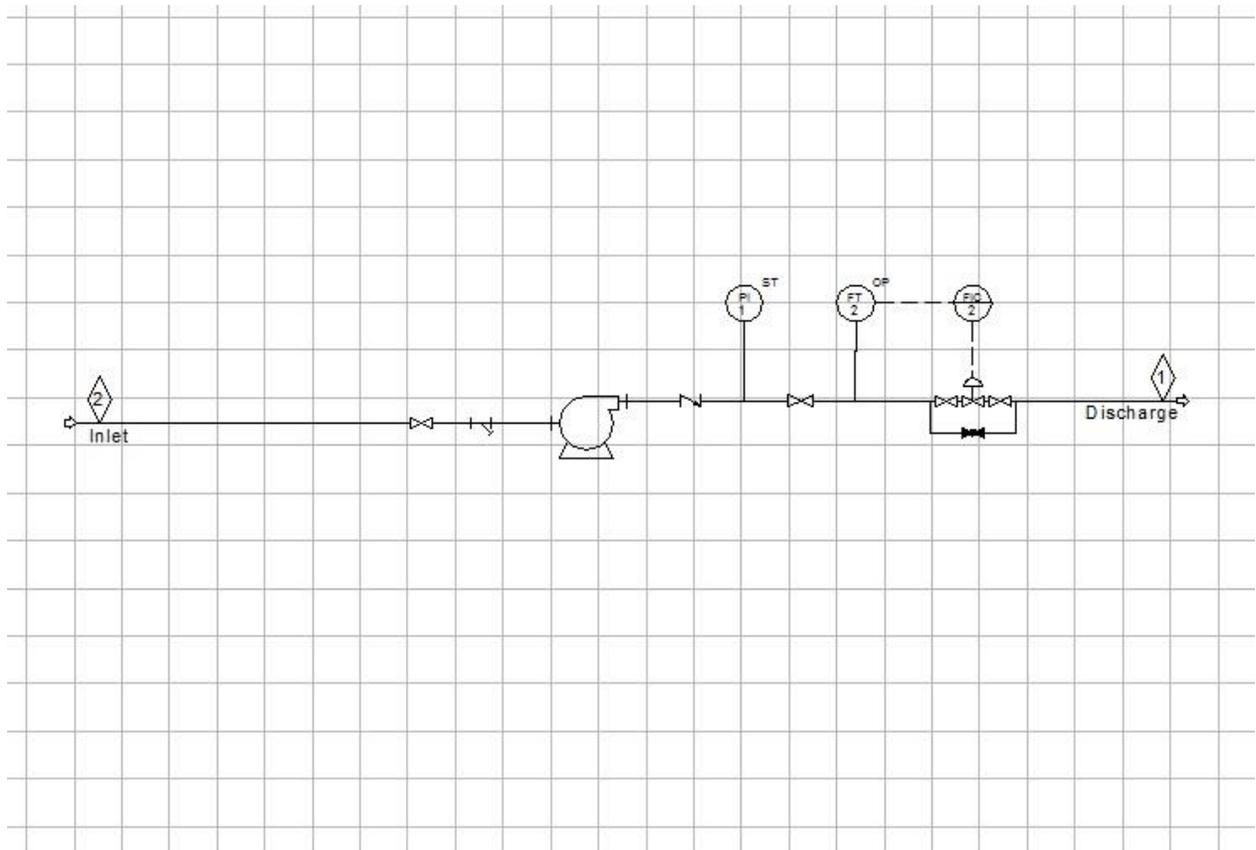


Figura 45. DTI típico para bombas

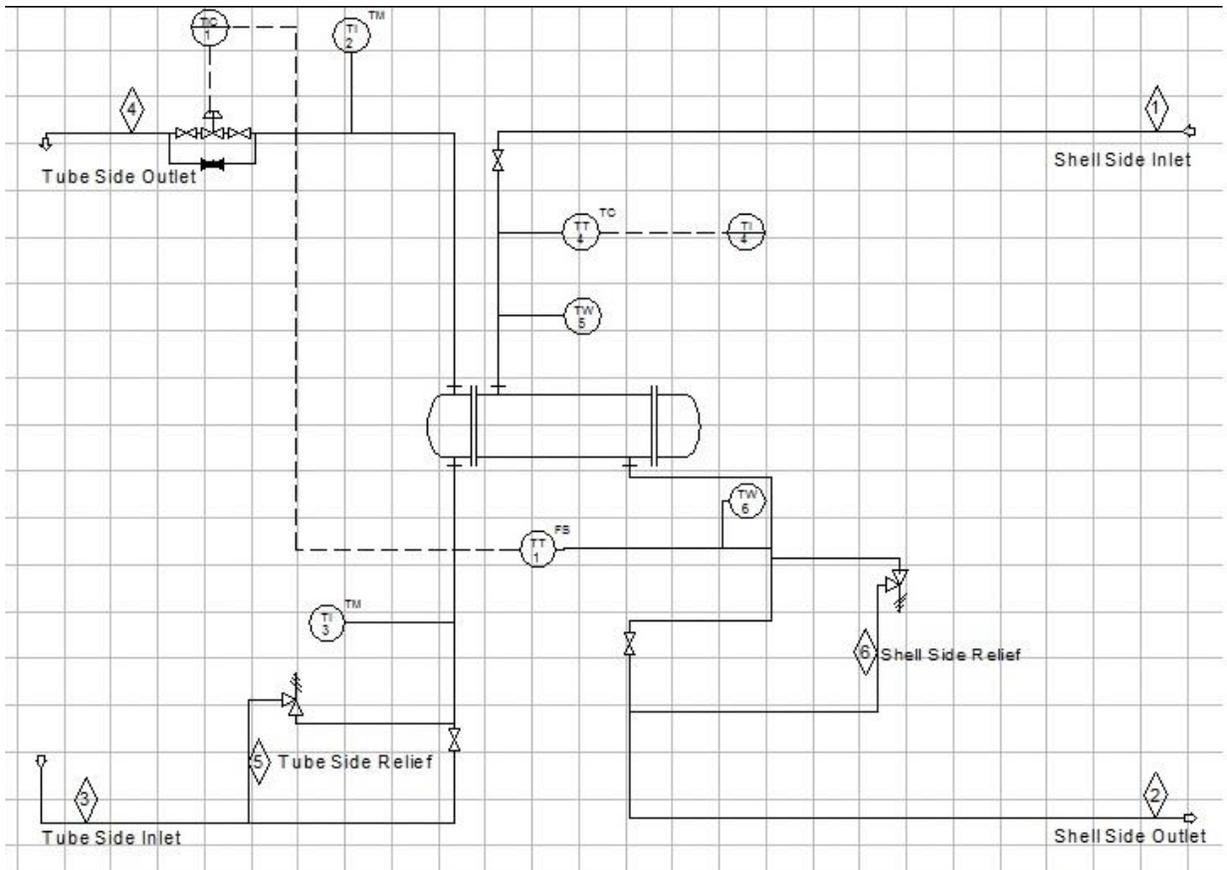


Figura 46. DTI típico para intercambiadores de calor tipo tubos y coraza

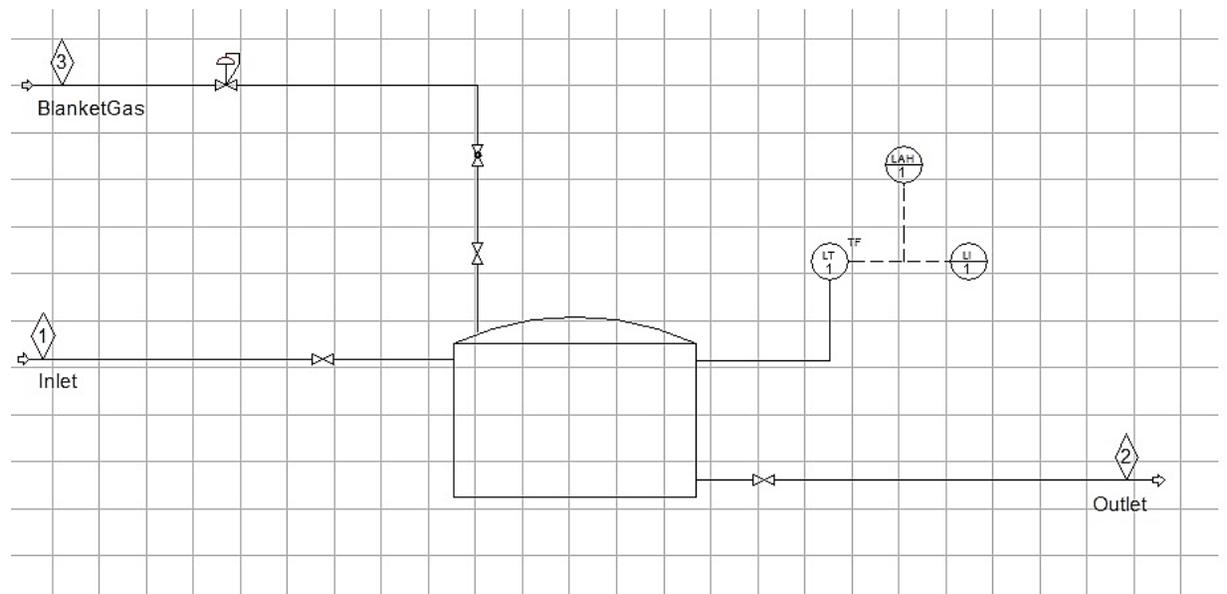


Figura 47. DTI típico para tanques de almacenamiento

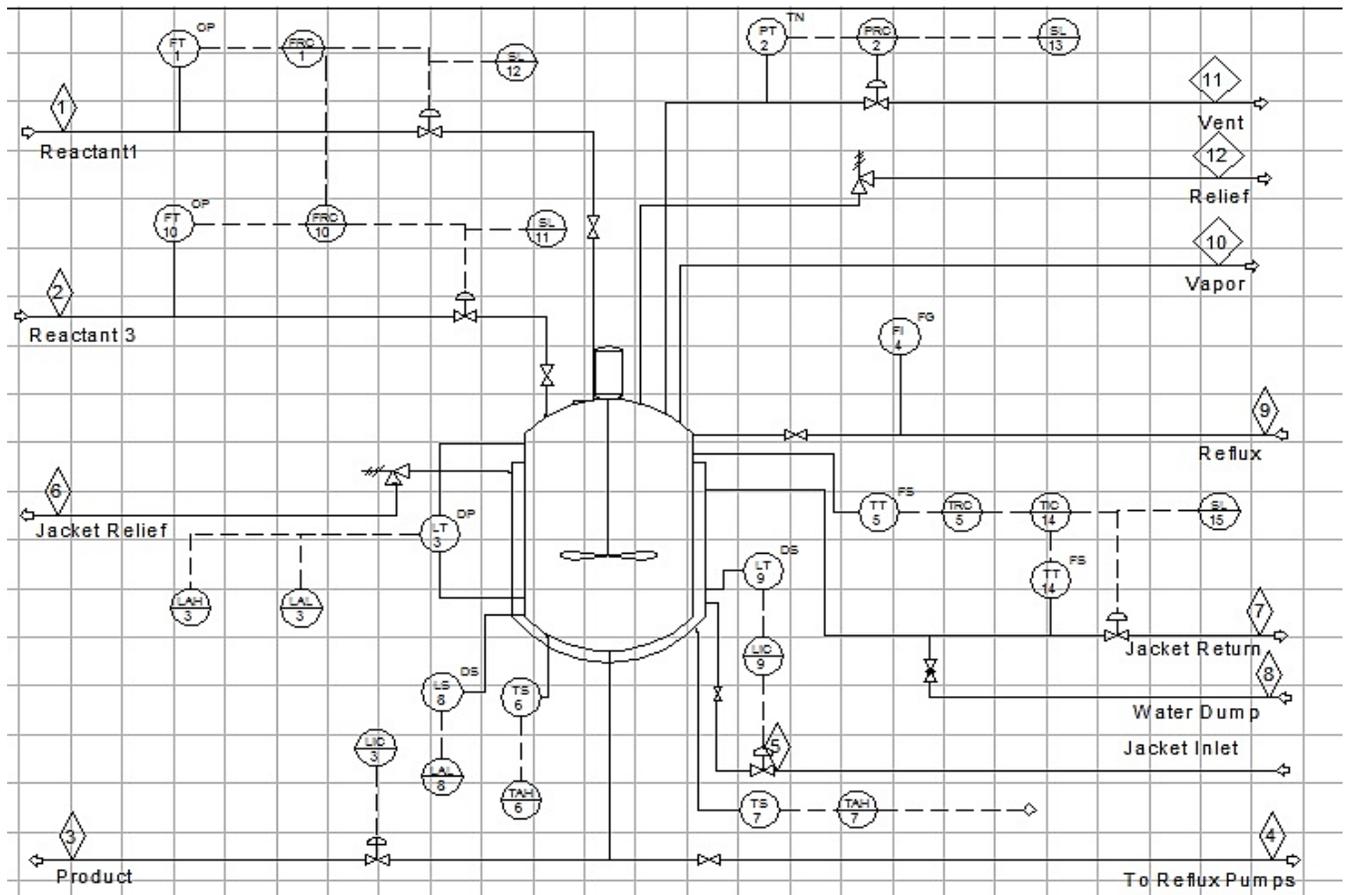


Figura 48. DTI típico para reactores agitados enchaquetados

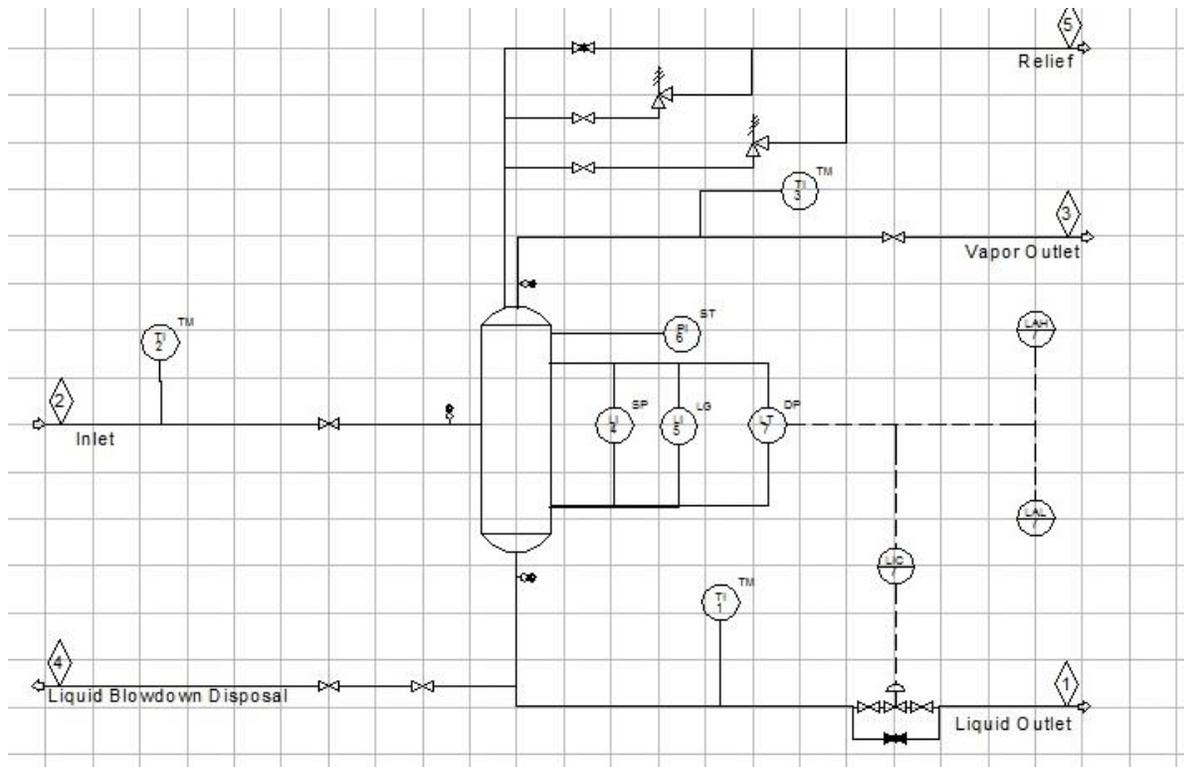


Figura 49. DTI típico para recipiente vertical

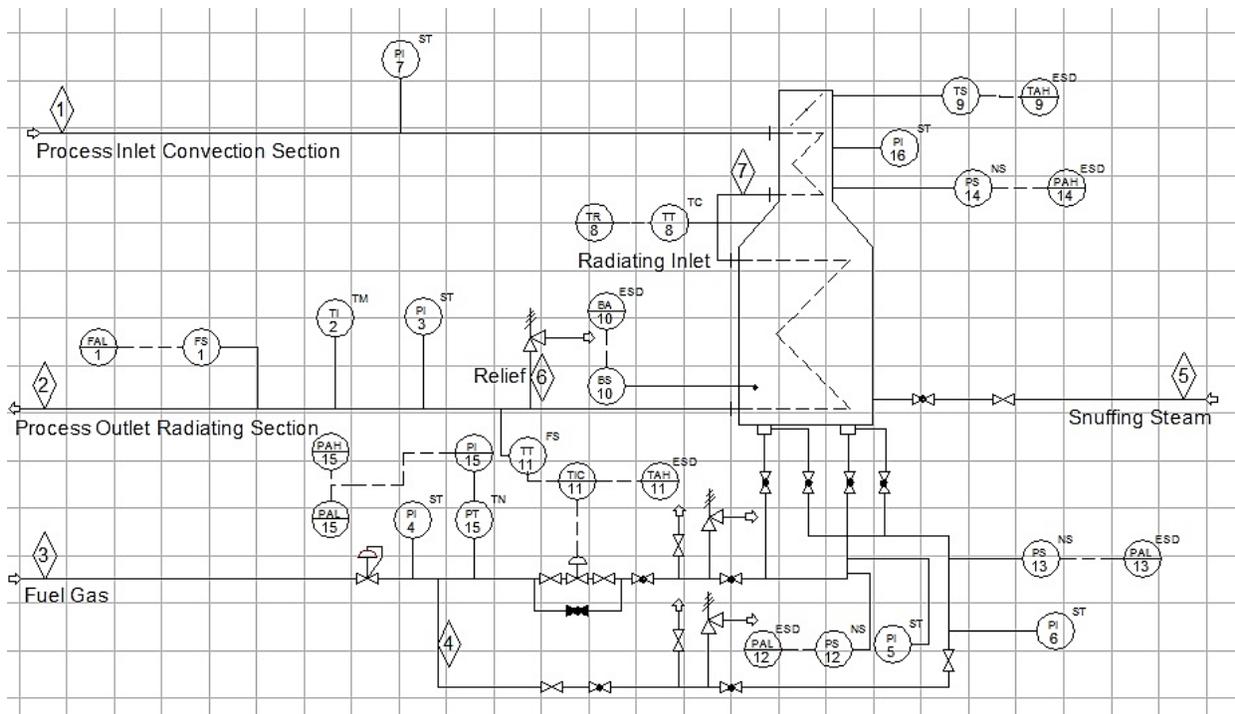


Figura 50. DTI típico de horno

# ANEXO 3

## Reporte completo de inversión

 <b>Aspen ICARUS</b>							
<b>Project Cost Summary</b>							
<b>Project Title:</b> Planta de resinas							
<b>Project Name:</b> RESINA				<b>Scenario Name:</b> RPI2			
<b>Proj. Location:</b> North America				<b>Job No:</b> --		<b>Prep. By:</b> --	
<b>Estimate Date:</b> 8MAY17 20:16:48				<b>Est. Class:</b> V-IV		<b>Currency:</b> DOLLARS USD	
Account	MH	Wage Rate	Labor Cost	Matl Cost	Total Cost	Percentages	
(2) Equipment	589	31.29	18,430	1,812,674	1,831,104	30.3% of TDC	
(3) Piping	13,551	30.71	416,152	443,039	859,191	14.2% of TDC	
(4) Civil	2,804	24.30	68,138	50,872	119,010	2.0% of TDC	
(5) Steel	108	28.81	3,106	18,828	21,935	0.4% of TDC	
(6) Instruments	15,275	31.25	477,401	1,351,124	1,828,526	30.3% of TDC	
(7) Electrical	4,803	30.11	144,630	753,408	898,037	14.9% of TDC	
(8) Insulation	5,725	23.32	133,518	162,038	295,557	4.9% of TDC	
(9) Paint	1,924	22.97	44,197	17,433	61,630	1.0% of TDC	
(10) Equipment Rental					121,100		
<b>Total Direct Field Costs</b>	<b>44,779</b>		<b>1,305,572</b>	<b>4,609,417</b>	<b>6,036,089</b>	98.0% of TDC	
	(TDMH)		(TDL)	(TDM)	(TDC)		
<b>Indirect Field Costs</b>	<b>7,607</b>				<b>1,575,200</b>	120.7% of TDL	
	(IFMH)				(IFC)		
<b>Total Field Costs</b>	<b>52,386</b>				<b>7,611,289</b>	63.5% of TIC	
	(TFMH)				(TFC)		
Freight							
Taxes and Permits							
Engineering and HO	21,579				2,440,200	20.3% of TIC	
Other Project Costs					852,385	7.1% of TIC	
Contingency					1,090,387	9.1% of TIC	
<b>Total Non-Field Costs</b>	<b>21,579</b>				<b>4,382,972</b>	36.5% of TIC	
	(HOMH)						
<b>Project Total Costs</b>					<b>11,994,261</b>	198.7% of TDC	
					(TIC)		



## Aspen ICARUS

### *Indirect Field Cost Summary*

Code	Description	Ind MH	Ind Cost
85	Field Const Supv	6,640	566,600
86	Start-up, Commissioning	967	132,000
	<b>Field Office Staff</b>	<b>7,607</b>	<b>698,600</b>
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
11	Fringe Benefits		274,200
12	Burdens		313,300
13	Consumables, Small Tools		39,200
14	Misc (Insurance, Etc)		98,600
15	Scaffolding		39,200
16	Equipment Rental		121,100
18	Field Services		91,900
19	Temp Const, Utilities		20,200
	<b>Construction Indirects Total</b>		<b>997,700</b>



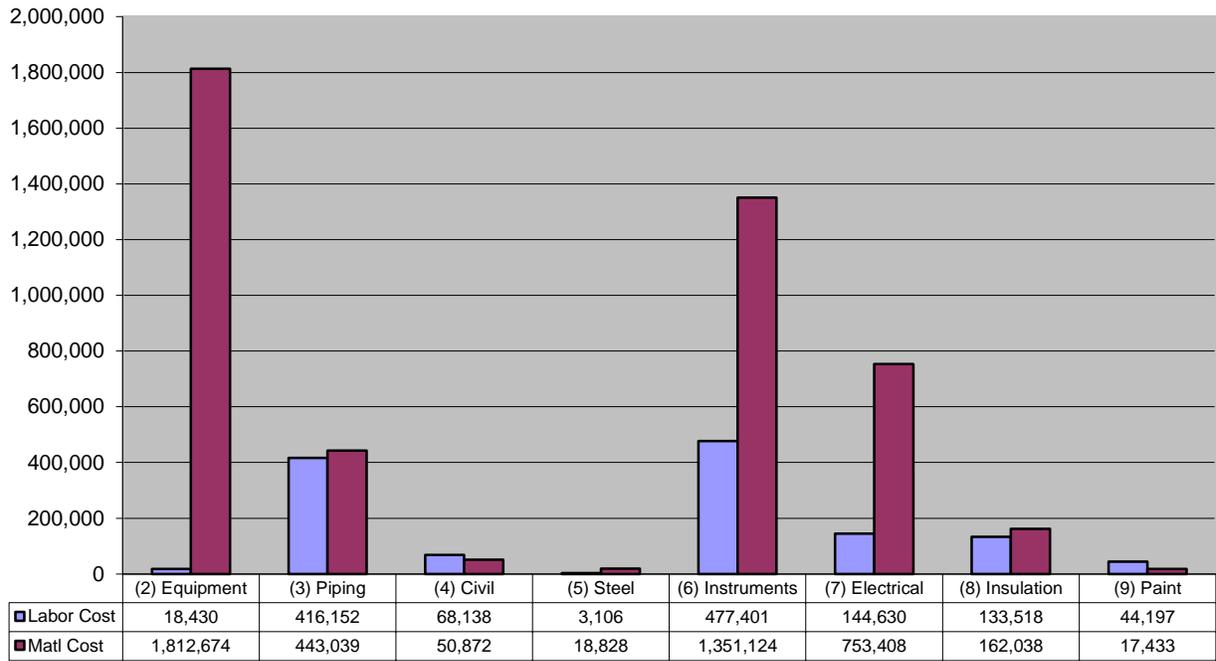
**Aspen ICARUS**

**Non - Field Cost Summary**

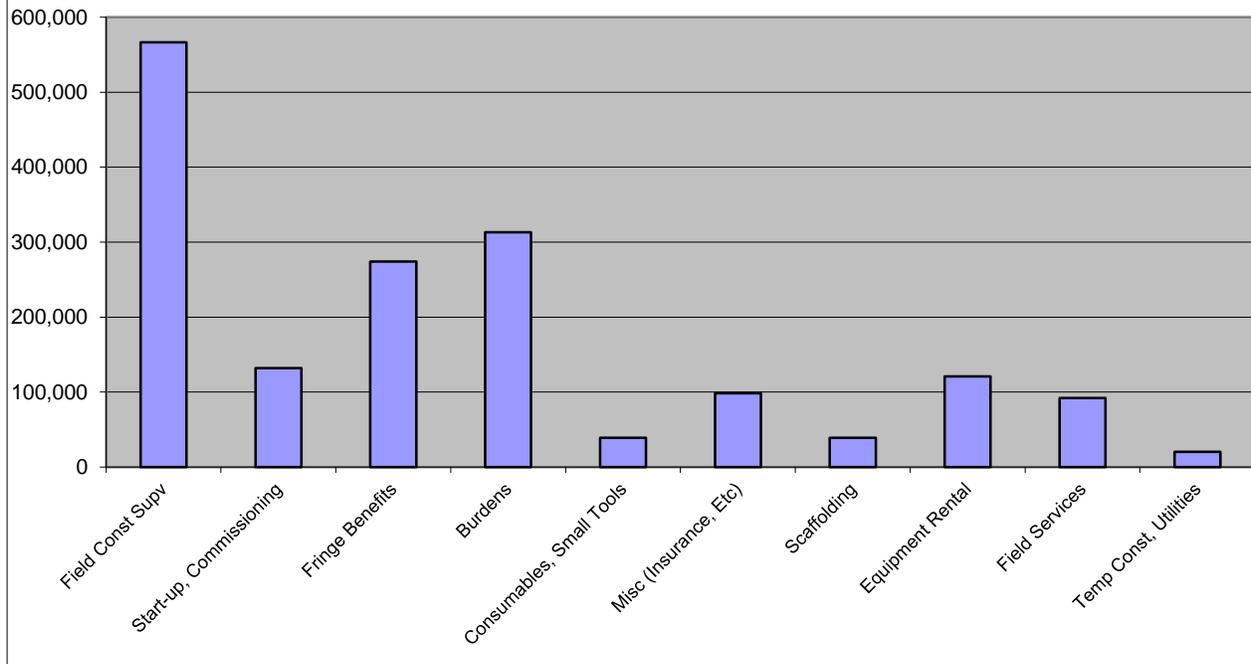
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
<b>Freight Total</b>			
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
<b>Taxes and Permits Total</b>			
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
71	Basic Engineering	3,687	447,200
72	Detail Engineering	14,016	1,596,800
73	Material Procurement	3,876	396,200
<b>Engineering &amp; HO Total</b>		<b>21,579</b>	<b>2,440,200</b>
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
81	Home Office Const Suppt	1,192	116,000
90	G and A Overheads		228,338
91	Contract Fee		508,047
<b>Other Project Costs Total</b>		<b>1,192</b>	<b>852,385</b>
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
99	Contingency		1,090,387
<b>Contingency Total</b>			<b>1,090,387</b>



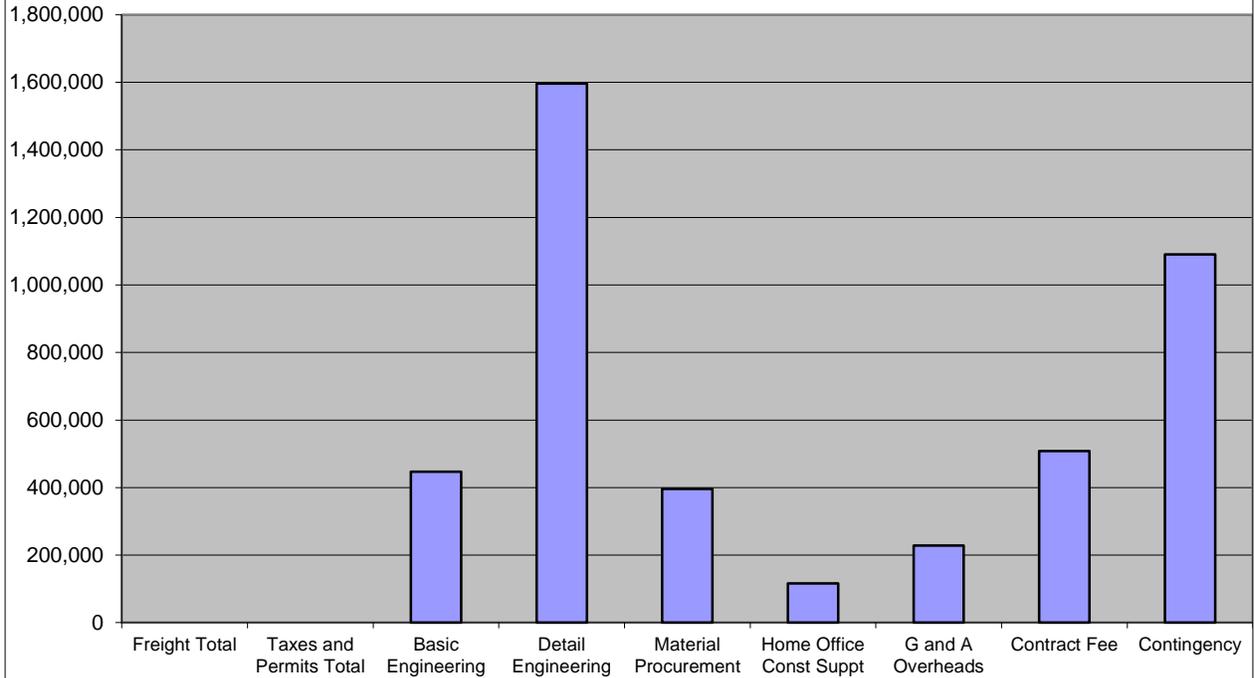
### Direct Field Costs



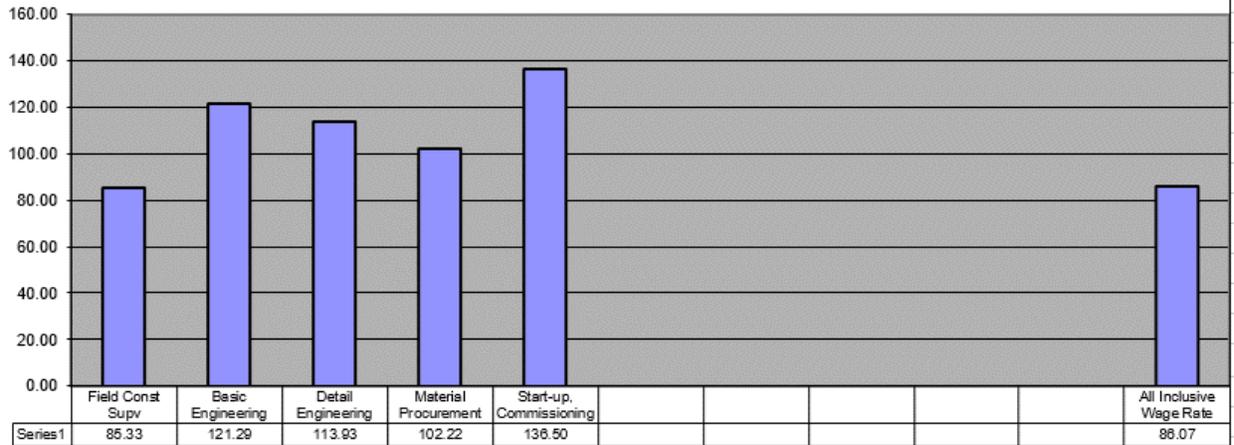
### Indirect Field Costs



### Non Field Costs



### Average Wage Rates



Note: Wage Rates Exclude G&A, Fee, Escalation



## Other Reports - Project

### List of Components

<b>Project Title:</b> Planta de resinas							
<b>Project Name:</b> RESINA				<b>Scenario Name:</b> RP2			
<b>Proj. Location:</b> North America				<b>Job No:</b> --		<b>Prep. By:</b> --	
<b>Estimate Date:</b> 8MAY17 20:16:48				<b>Est. Class:</b> V-N		<b>Currency:</b> DOLLARS USD	
ID	Component/Source	Tag No	MH	Labor	Matl	Total	Weight
1	TR-001 A/B(ID:1)		10,220	301,681	830,620	1,132,301	45149 KG
2	TR-002 A/B(ID:2)		10,291	303,298	946,811	1,250,109	49184 KG
3	TZ-001 A/B(ID:3)		4,149	118,488	752,856	871,344	38035 KG
6	DS-001 A/B(ID:6)		1,734	49,604	111,870	161,474	7509 KG
7	DS-002 A/B(ID:7)		1,643	47,028	89,732	136,760	7024 KG
9	BA-001 A/B(ID:9)		878	25,894	31,344	57,237	1904 KG
10	BA-002 A/B(ID:10)		527	15,256	16,196	31,452	1239 KG
11	BA-003(ID:11)		527	15,256	16,196	31,452	1239 KG
12	BA-004(ID:12)		814	23,985	26,712	50,696	1510 KG
13	BA-005(ID:13)		527	15,256	16,196	31,452	1239 KG
16	BA-008(ID:16)		494	14,305	23,837	38,142	1758 KG
17	CT-001(ID:17)		1,108	31,165	153,838	185,002	8863 KG
19	TV-002(ID:19)		464	12,963	38,954	51,917	4378 KG
20	TV-003(ID:20)		338	9,674	24,032	33,706	1712 KG
21	TV-004(ID:21)		412	11,545	32,042	43,587	3460 KG
26	CH-001 A/B(ID:26)		1,692	47,331	94,333	141,664	9837 KG
27	CH-002 A/B(ID:27)		1,849	51,381	110,761	162,142	13677 KG
29	CB-001(ID:29)		20	632	60,974	61,606	KG
<b>Totals:</b>			37,687	1,094,740	3,377,304	4,472,043	



### Other Reports - Project

#### List of Equipment

<b>Project Title:</b>		Planta de resinas							<b>Prep. By:</b>	--
<b>Project Name:</b>		RESINA		<b>io Name:</b>	RF2		<b>Proj. Location:</b>	North America		
<b>Estimate Date:</b>		8MAY17 20:16:48		<b>st. Class:</b>	V-IV		<b>Job No:</b>	--	<b>Currency:</b>	DOLLARS USD
Equipment Class	ID	Component/Source	Tag No	MH	Labor	Matl	Total	Equip Weight	Material	
Agitated Tanks	1	TR-001 A/B(ID:1)			50	1,580	347,200	348,780	11000 KG	A285C
Agitated Tanks	2	TR-002 A/B(ID:2)			50	1,580	465,200	466,780	15600 KG	A285C
Agitated Tanks	3	TZ-001 A/B(ID:3)			50	1,580	551,000	552,580	19400 KG	A285C
Vertical Tanks	6	DS-001 A/B(ID:6)			50	1,580	15,800	17,380	1020 KG	A 516
Vertical Tanks	7	DS-002 A/B(ID:7)			50	1,580	16,000	17,580	1060 KG	A 516
Centrifugal Pumps	9	BA-001 A/B(ID:9)			20	632	7,800	8,432	160 KG	CS
Centrifugal Pumps	10	BA-002 A/B(ID:10)			20	632	7,800	8,432	160 KG	CS
Centrifugal Pumps	11	BA-003(ID:11)			20	632	7,800	8,432	160 KG	CS
Centrifugal Pumps	12	BA-004(ID:12)			20	632	7,800	8,432	160 KG	CS
Centrifugal Pumps	13	BA-005(ID:13)			20	632	7,800	8,432	160 KG	CS
Centrifugal Pumps	16	BA-008(ID:16)			20	632	8,400	9,032	200 KG	CS
Cooling Towers	17	CT-001(ID:17)					102,900	102,900	2800 KG	GALV
Vertical Tanks	19	TV-002(ID:19)			25	790	17,600	18,390	1800 KG	A285C
Vertical Tanks	20	TV-003(ID:20)			25	790	9,400	10,190	520 KG	A285C
Vertical Tanks	21	TV-004(ID:21)			25	790	13,200	13,990	1300 KG	A285C
Heat Exchangers	26	CH-001 A/B(ID:26)			58	1,732	23,400	25,132	1240 KG	A 214
Heat Exchangers	27	CH-002 A/B(ID:27)			67	2,003	24,800	26,803	1580 KG	A 214
Cost Know n Equipmer	29	CB-001(ID:29)			20	632	60,974	61,606	KG	
<b>Totals:</b>					<b>589</b>	<b>18,430</b>	<b>1,694,874</b>	<b>1,713,304</b>		



Economic Evaluation

## Other Reports - Area

### List of Equipment

Project Title: Planta de resinas		Scenario Name: RP2		Proj. Location: North America		Prep. By: --				
Project Name: RESINA		Est. Class: V-IV		Job No: --		Currency: DOLLARS USD				
Estimate Date: 8MAY17 20:16:48										
Area#	Area	Equipment Class	Component/Source	Tag No	MH	Labor Cost	Matl Cost	Total	Equip Weight	Material
01.01	Main Area	Agitated Tanks	TR-001 A/B(ID:1)		50.00	1,580	347,200	348,780.04	11000 KG	A285C
01.01	Main Area	Agitated Tanks	TR-002 A/B(ID:2)		50.00	1,580	465,200	466,780.04	15600 KG	A285C
01.01	Main Area	Agitated Tanks	TZ-001 A/B(ID:3)		50.00	1,580	551,000	552,580.04	19400 KG	A285C
01.01	Main Area	Vertical Tanks	DS-001 A/B(ID:6)		50.00	1,580	15,800	17,380.04	1020 KG	A 516
01.01	Main Area	Vertical Tanks	DS-002 A/B(ID:7)		50.00	1,580	16,000	17,580.04	1060 KG	A 516
01.01	Main Area	Centrifugal Pumps	BA-001 A/B(ID:9)		20.00	632	7,800	8,432.02	160 KG	CS
01.01	Main Area	Centrifugal Pumps	BA-002 A/B(ID:10)		20.00	632	7,800	8,432.02	160 KG	CS
01.01	Main Area	Centrifugal Pumps	BA-003(ID:11)		20.00	632	7,800	8,432.02	160 KG	CS
01.01	Main Area	Centrifugal Pumps	BA-004(ID:12)		20.00	632	7,800	8,432.02	160 KG	CS
01.01	Main Area	Centrifugal Pumps	BA-005(ID:13)		20.00	632	7,800	8,432.02	160 KG	CS
01.01	Main Area	Centrifugal Pumps	BA-008(ID:16)		20.00	632	8,400	9,032.02	200 KG	CS
01.01	Main Area	Cooling Towers	CT-001(ID:17)				102,900	102,900.00	2800 KG	GALV
01.01	Main Area	Vertical Tanks	TV-002(ID:19)		25.00	790	17,600	18,390.02	1800 KG	A285C
01.01	Main Area	Vertical Tanks	TV-003(ID:20)		25.00	790	9,400	10,190.02	520 KG	A285C
01.01	Main Area	Vertical Tanks	TV-004(ID:21)		25.00	790	13,200	13,990.02	1300 KG	A285C
01.01	Main Area	Heat Exchangers	CH-001 A/B(ID:26)		57.53	1,732	23,400	25,132.11	1240 KG	A 214
01.01	Main Area	Heat Exchangers	CH-002 A/B(ID:27)		66.53	2,003	24,800	26,803.04	1580 KG	A 214
01.01	Main Area	Cost Know n Equipment	CB-001(ID:29)		20.00	632	60,974	61,606.34	KG	
<b>Totals :</b>					<b>589.06</b>			<b>1,713,303.87</b>		



Economic  
Evaluation

Other Reports - Project

Equipment Summary - Total Cost

		Project Title: Planta de resinas											
		Project Name: RESINA						Scenario Name: RP2					
		Proj. Location: North America				Job No: --				Prep. By: --			
		Estimate Date: 8MAY 17 20:16:48				Est. Class: V-IV				Currency: DOLLARS USD			
ID	Component	Tag No.	Component Total	Equipment	Piping	Civil	Steel	Instrumentation	Electrical	Insulation	Paint		
9	BA-001 AB		57,237	8,432	20,267	1,699		17,922	5,360				3,557
10	BA-002 AB		31,452	8,432	12,929	1,699		728	5,360				2,304
11	BA-003		31,452	8,432	12,929	1,699		728	5,360				2,304
12	BA-004		50,696	8,432	16,198	1,699		15,847	5,360				3,160
13	BA-005		31,452	8,432	12,929	1,699		728	5,360				2,304
16	BA-008		38,142	9,032	19,284	1,699		728	5,360				2,039
29	CB-001		61,606	61,606									
26	CH-001 AB		141,664	25,132	55,159	4,915		30,709		23,020			2,729
27	CH-002 AB		162,142	26,803	68,271	4,915		30,018		28,770			3,365
17	CT-001		185,002	102,900	38,393	18,166		19,986	2,680				2,876
6	DS-001 AB		161,474	17,380	49,659	4,235		67,871		19,361			2,968
7	DS-002 AB		136,760	17,580	44,690	4,367		49,381		18,055			2,687
1	TR-001 AB		1,132,301	348,780	182,896	9,336		490,902	7,747	81,977			10,664
2	TR-002 AB		1,250,109	466,780	183,109	9,870		490,902	7,006	81,755			10,687
19	TV-002		51,917	18,390	15,303	6,451	1,008	7,122	1,700				1,944
20	TV-003		33,706	10,190	11,810	3,479		7,122					1,105
21	TV-004		43,587	13,990	15,167	5,528		7,122					1,781
3	TZ-001 AB		871,344	552,580	72,355	11,635	20,927	155,026	11,047	42,619			5,155
<b>Totals:</b>			<b>4,472,043</b>	<b>1,713,304</b>	<b>831,345</b>	<b>93,088</b>	<b>21,935</b>	<b>1,392,843</b>	<b>62,341</b>	<b>295,557</b>			<b>61,630</b>



## ANEXO 4

Tabla de flujo de efectivo descontado

Donde

$$VPN = \sum \frac{F}{(i + 1)^n} = -Inverion + \sum \frac{utilidad\ anual\ antes\ de\ impuesto}{(1 + i)^n}$$

$$TIR = i(\%),\ cuando\ VPN = 0$$

Producción (ton)	0	0	0	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Egresos		Millones de pesos mexicanos																	
	Costo unitario \$(MXN)/kg																		
Construcción		\$108.34	\$108.34	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Materia prima	22.80		\$0.00	\$124.96	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80	\$136.80
Energía eléctrica	0.15		\$0.00	\$0.84	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92	\$0.92
Gas natural	0.16		\$0.00	\$0.87	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$0.95
Mano Obra	0.14			\$0.78	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86	\$0.86
<b>Total</b>		<b>\$108.34</b>	<b>\$108.34</b>	<b>\$127.45</b>	<b>\$139.53</b>														
Ingresos		Millones de pesos mexicanos																	
Inversión		\$228.83																	
Ventas	32			\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00	\$192.00
Utilidad antes de impuestos				\$64.55	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47	\$52.47
<b>Monto de inversión</b>	<b>\$228.83</b>	<b>Millones de pesos</b>																	
<b>Tasa de descuento anual</b>	<b>6.64%</b>																		
<b>Valor presente neto</b>	<b>\$211.07</b>	<b>Millones de pesos</b>																	
<b>Tasa interna de retorno</b>	<b>15.74%</b>																		
<b>Tiempo de retorno</b>	<b>5 años</b>																		