

## ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE ASFALTO MODIFICADO CON PET RECICLADO EN CALIENTE

### FEASIBILITY ASSESSMENT OF A HOT MIX ASPHALT PLANT MODIFIED WITH RECYCLED PET

Rodríguez-Lehovec A. <sup>1\*</sup>, Olán-Acosta M.A <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura

\* Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Km 1, Col. La Esmeralda, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México.

\*lehovec12@hotmail.com

#### RESUMEN

El politereftalato de etileno (PET) es el plástico más usado universalmente. Por su gran durabilidad y resistencia a la biodegradación constituye un recurso valorizable para su reciclaje, logrando con ello beneficios para el medio ambiente. Una alternativa para el reciclaje químico del PET se presenta al mezclarlo con asfalto, los beneficios resultan en el ahorro de energía, reducción de la contaminación plástica y una mayor vida útil de carreteras ante las deformaciones. En este trabajo se presenta un estudio de factibilidad para la producción de asfalto modificado a partir de material reciclado en el estado de Tabasco. La metodología se desarrolló mediante cuatro etapas: estudio de mercado, factibilidad técnica, factibilidad económica y factibilidad operacional. Se evaluaron cuatro esquemas tecnológicos para la producción de PET: mecánico, glicólisis, aminólisis y alcoholólisis. Se determinó mediante el método matricial que el proceso de aminólisis presenta mejores ventajas y aumenta las propiedades del asfalto con PET, así mismo, se determinó que el área mínima de la planta debe ser de 5,000 m<sup>2</sup> y la mejor ubicación sería en la localidad de Sabina, Centro, Tabasco. Se calculó un costo fijo total de la planta en \$4,338,939.72 dólares evaluada en clase 5. La estimación de la duración del proyecto sería de 14.72 meses con un

personal previsto de 75 trabajadores para la construcción y 5 ingenieros de procesos. De acuerdo con los resultados el estado de Tabasco representa un área de oportunidad e inversión pertinente tanto para las organizaciones dedicadas al reciclaje como para los inversionistas en la producción de asfalto modificados.

**Palabras clave:** Asfalto con PET, Estimación económica, Jerarquización analítica, Método matricial, Reciclaje.

#### ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET) is the most used plastic in the world. Owing to its great durability and biodegradability resistance makes a recoverable resource for its recycling, achieving benefits for the environment. An alternative for chemical recycling of PET is mixing it with asphalt. The advantages of this are working on save on energy, reduction of plastic pollution and a longer useful life of roads in face of deformations. In this work is presented a feasibility study to produce modified asphalt from recycling material in the state of Tabasco. The methodology was developed in four stages: market research, technical feasibility, economic feasibility, and operational feasibility. Four technological diagrams were evaluated to produce PET: mechanical, glycolysis, aminolysis and alcoholysis. It was determined throughout the matrix method that the process of aminolysis

presents better advantages and increases the properties of asphalt with PET. Moreover, it was determined that the minimum area of the plant must be 5,000 m<sup>2</sup>, and the best location will be in Sabina, Centro, Tabasco. It was calculated a total fixed cost of \$4,338,939.72 dollars evaluated in class five. The estimation of duration of the project will be 14.72 months with a planned staff of 75 construction workers and 5 process engineers. It concludes that in the state of Tabasco the recycling companies have not dominated this market, therefore, there is an area of opportunity and relevant investment.

**Key words:** Analytical hierarchy, Asphalt with PET, Economic estimation, Matrix Method, Recycling.

## INTRODUCCIÓN

El uso del plástico inicialmente se empezó a utilizar como una oportunidad para disminuir los costos de embalaje, preservar los alimentos perecederos manteniendo el sabor y el valor nutricional o para otros usos en general. Sin embargo, su uso se ha convertido en una adicción sin considerar el costo y el impacto que tiene con el medio ambiente. Por sus diversas propiedades físicas y químicas el plástico no es biodegradable y se funde o descompone a temperaturas superiores a los 200 °C [1].

El reciclaje ha confrontado la problemática mundial con respecto a la disposición final de los plásticos. Casi la totalidad de los polímeros recolectados de los desechos domésticos son botellas de plástico, alrededor del 55-60 % están hechos de PET [2]. Este material es uno de los productos posconsumo que más se recupera debido a su alto precio de venta de \$6.80 peso mexicano por kilogramo [3]. En 2019, en México, la

demanda de PET fue de 900,000 t y solo se manufacturaron 800,000 t, de los cuales solo se recicló el 15 % [4], esto representa que la cantidad restante de plásticos se encuentra en cualquier lugar en espera de ser recolectado o degradado. Estimaciones sobre el cambio climático determinan que para el 2030 las emisiones anuales gases de efecto invernadero sean de 1,340 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y se prevé que en los siguientes 20 años se duplique [5].

En Tabasco en los últimos 15 años, la generación de los residuos aumentó en un 10.5 % derivado del crecimiento de la población y de la ampliación de las zonas urbanas. Los ríos y lagunas resultan afectados al recibir parte de los desechos, hasta 1,000 t de basura se producen en el estado, esto se debe al consumo de productos empaquetados, botellas, bolsas de basura y cosméticos [6].

Al reciclar el residuo sólido urbano (RSU) de PET los beneficios se obtienen en el ahorro de energía en los procesos, en la disminución de extracción de recursos naturales y primordialmente en la reducción de la contaminación [7, 8], además, si se mezcla el PET con la mezcla de asfalto, no solo se aumentan sus propiedades, sino que también en términos de valor financiero puede reducir el costo de construcción por ser más económico que el asfalto [2] y así mismo, se aumentan las propiedades (reológicas) del pavimento tales como flexibilidad, rigidez y fatiga [9]. El asfalto modificado debe ser capaz de soportar cargas generadas por el tránsito y las condiciones ambientales, además debe de brindar una superficie que permita el tráfico seguro [10].

En el estado de Tabasco, no existen registros de empresas dedicadas a la

producción específicamente de carreteras utilizando PET. Esta labor ha obtenido mucha popularidad desde sus inicios en Europa y se ha tratado de replicar en otras partes del mundo como en Asia [11]. En México, esta actividad es incipiente, el primer registro de la construcción de carreteras a base de PET se encuentra en el norte del país [12]. Con base en estos antecedentes, el propósito de este trabajo es determinar la factibilidad técnica, económica y operacional que permita el establecimiento de las bases tecnológicas y de los recursos necesarios para el establecimiento de una planta de asfalto modificado usando como insumo el PET reciclado y recolectado en el estado de Tabasco.

## METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó mediante una metodología de cuatro etapas: 1) estudio de mercado, 2) factibilidad técnica, 3) factibilidad económica y 4) factibilidad operacional.

**1) Estudio de mercado.** En esta etapa se analizaron las necesidades del mercado tanto para el reciclaje del PET como para el número suficiente de consumidores o usuarios que constituyan una demanda del asfalto modificado. En esta etapa se realizaron búsquedas bibliográficas para recopilar información del entorno del mercado, proveedores y posibles clientes.

**2) Factibilidad técnica.** Se analizaron cuatro diferentes alternativas de esquemas tecnológicos para seleccionar el más adecuado para la obtención del PET. En esta etapa se utilizó la técnica matricial de evaluación tecnológica [13] establecida a partir de las bases de diseño de la planta. Así mismo, se determinó la localización de la planta mediante la técnica de jerarquización

analítica [14]. Para el esquema tecnológico seleccionado se desarrolló el diagrama de entradas-salidas que permitió determinar la cantidad de materia prima y producto obtenido. Se determinaron los equipos requeridos para el proceso, se realizó la distribución de equipos en la planta utilizando el método de planeación sistemática SLP (*Systematic Layout Planning*) [15].

**3) Factibilidad económica.** El diagrama de entradas-salidas se estimaron los costos de materia prima y productos con lo cual se estimó el beneficio bruto y mediante el método de factores se estimó el costo del capital en clase 5 (con una precisión de  $\pm 30\%$  -  $50\%$ ) de acuerdo con la Asociación para la Promoción de la Estimación del Costo Internacional (AACE Internacional) [16]. Así mismo se determinaron los costos dentro de los límites de batería, costos fuera de los límites de batería, costos de diseño e ingeniería y costos por contingencia.

**4) Factibilidad operacional.** Mediante la aplicación de heurísticas se estimó la planeación, la duración del proyecto y el personal de ingeniería involucrado [17].

## RESULTADOS

**1) Estudio de mercado.** De acuerdo con el informe de Greenpeace se encontró que únicamente 16 estados de la República Mexicana cuentan con registros de centros de acopio para PET [3]. Basado en la información obtenida por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos en la región centro del estado de Tabasco, se obtuvo la composición de los residuos que se vierten a través del servicio de limpia. En dicho informe el PET representa un 2.32

% de generación de los 528,961 t/año [18].

El PET reciclado se utiliza fundamentalmente en las siguientes demandas, tales como en fibras (producción de alfombras, ropa, telas), embalaje (manufactura de bebidas, comidas, perfumería y cosméticos, productos para el hogar, licores, productos farmacéuticos, entre otros) y películas (radiografías, cintas de video y audio) **Figura 1**. Dicha actividad genera 27 mil empleos directos y 150 mil indirectos [2].



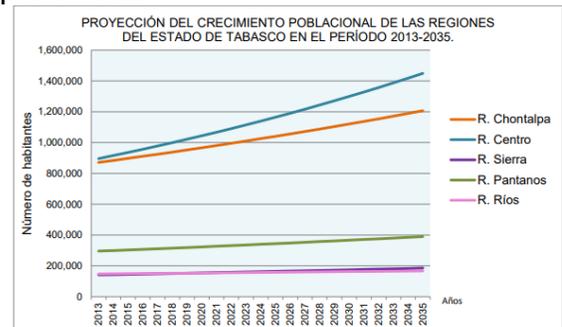
**Figura 1.** Usos del PET en México (Fuente: Propia).

Los principales demandantes de la actividad relacionada con la producción de asfaltos modificados a nivel federal y estatal son: Petróleos Mexicanos, caminos y puentes federales, a nivel municipal y regional de Tabasco a través del plan de estatal de desarrollo 2019-2024 que indica que el impulso de la diversificación y el logro de un crecimiento sostenido se fundamenta en aprovechar la ubicación geográfica estratégica de Tabasco. Para conseguirlo, se requiere de una infraestructura de transporte y comunicaciones que permita consolidar esa ventaja, así como alcanzar una integración competitiva y productiva con Campeche, Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Veracruz y Yucatán [19].

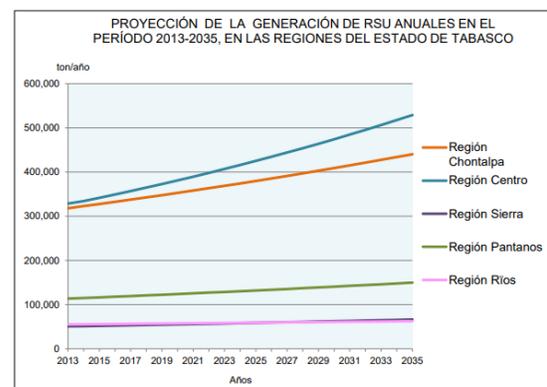
De acuerdo con lo analizado se presenta la siguiente situación actual: acorde con estimaciones de la Asociación Nacional

de Industrias del Plástico (ANIPAC), el reciclaje en México tiene un valor potencial de \$3,000 millones de dólares y mantiene un crecimiento de 10 % por año. Se calcula que el valor potencial del mercado de reciclaje de PET asciende a \$700 millones de dólares anuales en todo el mundo, mientras que el valor actual de la industria de reciclaje de PET en México se calcula en \$44 millones de pesos [4].

La proyección que se plantea a futuro se muestra en las **Figuras 2 y 3**, donde se compara la proyección del crecimiento poblacional de las diferentes regiones de la entidad de Tabasco en el periodo 2013 al 2035 [18], así mismo, también se compara la proyección de generación de RSU de las mismas regiones proporcionales al incremento de la población.



**Figura 2.** Crecimiento de la población 2013-2035 estimada para las diferentes regiones del estado de Tabasco. Fuente: [18].



**Figura 3.** Crecimiento RSU 2013-2035 estimada para las diferentes regiones del estado de Tabasco. Fuente: [18].

Conforme con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México el parque vehicular es de más de 26 millones de unidades entre automóviles, camiones ligeros y pesados, así como tractocamiones y autobuses. Diversas investigaciones e iniciativas se han realizado para tratar de solventar el problema de la deformación de los asfaltos [20]. Cuando el pavimento tiene asfalto sin polímero, este se reblandece a los 70 °C y se forman ondas; a los 0 °C se quiebra como si fuera vidrio. En cambio, cuando se utiliza asfalto modificado, puede resistir un rango de temperaturas que va de los 100 a -20 °C sin sufrir deformaciones permanentes. Además, el asfalto con polímero limita el paso del agua, una de las principales causas de la formación de surcos [21].

**2) Factibilidad técnica.** El esquema preliminar para el proceso de producción del asfalto modificado se presenta en la **Figura 4**.

La selección de tecnología se realizó para el proceso 1 del diagrama mostrado en la Figura 4.



**Figura 4.** Diagrama preliminar del proceso de producción de asfalto modificado (Fuente: Propia).

Las alternativas analizadas fueron: el método mecánico (A<sub>1</sub>) [22], y los métodos químicos: con adición de glicoles (A<sub>2</sub>) [23], aminas (A<sub>3</sub>) [24], o alcoholes (A<sub>4</sub>) [25]. La evaluación se realizó por el método matricial evaluando diversos factores por cada tecnología, seleccionando la que obtenga mayor puntuación [13]. Cada tecnología se evaluó a partir de siete factores: 1) características del proceso, 2) características del asfalto modificado, 3) actualización del proceso, 4) flexibilidad del proceso, 5) consumo de materias primas, 6) impacto ecológico y 7) tratamiento de efluentes. Los resultados se muestran en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Resultados de la evaluación de tecnologías para la obtención del PET (Fuente: Propia).

Factores	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
1. Características del proceso	1.277	1.152	1.041	0.819
2. Características del asfalto modificado	1,483	2.079	2.39	2.004
3. Actualización del proceso	0.429	0.571	0.571	0.571
4. Flexibilidad del proceso	0.833	0.744	0.744	0.744
5. Consumo de materias primas	0.5	0.25	0.375	0.375
6. Impacto ecológico	0.444	0.222	0.333	0.222
7. Tratamiento de efluentes	0.444	0.333	0.222	0.333
<b>TOTAL</b>	<b>5.856</b>	<b>5.576</b>	<b>6.012</b>	<b>5.293</b>

Como resultado de la evaluación, se determinó que la alternativa más factible es la  $A_3$ , puesto que el total evaluado fue mayor que las  $A_1, A_2$  y  $A_4$ . Para la localización de la planta se utilizó la jerarquización analítica utilizando cinco criterios y cuatro alternativas. Los

criterios establecidos fueron: a) distancia con los centros de acopio, b) disponibilidad de servicios, c) distancia con la población, d) distancia con los proveedores de asfalto y e) estrategias de comercialización. En la **Tabla 2** se muestran los criterios establecidos

**Tabla 2.** Criterios y evaluaciones para los terrenos previstos para la ubicación de la planta (Fuente para criterios de distancia: Google Maps).

	Terreno uno	Terreno dos	Terreno tres	Terreno cuatro
Distancia a centros de acopio (km)	26.8	25.8	24.1	25.4
Disponibilidad de servicios	5	3	4	4
Distancia con la población (m)	149	93.99	76.12	93.72
Distancia con los proveedores de asfalto (km)	4.2	4.3	4.5	4.9
Distancia por estrategias de comercialización (km)	12.9	13	13.1	15.9

Las alternativas consideradas como los lugares estratégicos donde se planea

construir la planta se muestran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Localización de terrenos en el municipio de Centro, Tabasco (Fuente: Google Maps).

Terreno	Ubicación	Área (m2)
Uno	Ctra. Ría Boquerón, Buena Vista Río Nuevo 1a Secc, Tab.	5,000.16
Dos	20 de noviembre 462-336, Sabina, 86153 Villahermosa, Tab.	5,001.03
Tres	Prolongación de Ignacio Allende, Sabina, 86153 Villahermosa, Tab.	4,999.83
Cuatro	Periférico Carlos Pellicer Cámara, Tamulté de las Barrancas, 86179 Villahermosa, Tab.	5,000.37

Los resultados de la técnica de jerarquía analítica se muestran en la **Tabla 4**. Se puede apreciar que la mejor alternativa es para el terreno tres, por lo que el punto estratégico para situar la planta se

encuentra en Prolongación de Ignacio Allende, Sabina, 86153, Villahermosa, Tabasco y como segunda opción la alternativa 1.

**Tabla 4.** Peso de la matriz de criterios y alternativas obtenidos por la técnica de la jerarquización analítica (Fuente: Propia).

Peso matriz de los criterios	Peso de la matriz de alternativas	Peso por alternativa
0.5028195	0.0568898	Alternativa 1 0.32872486
	0.12187261	
	0.55789248	
	0.26334511	
0.26023159	0.60648148	Alternativa 2 0.12858194
	0.05092593	
	0.1712963	
	0.1712963	
0.12435044	0.63395663	Alternativa 3 0.34459893
	0.20058812	
	0.04074674	
	0.12470851	
0.06777767	0.55024106	Alternativa 4 0.12858194
	0.25201638	
	0.15534873	
	0.04239383	
0.03483081	0.5694157	
	0.28773875	
	0.10050013	
	0.04234543	

La distribución de los equipos en la planta se realizó mediante el método SLP, a partir de la descripción del proceso se contabilizaron las áreas de producción, así como los lugares de

almacenamiento y se evaluaron las relaciones de actividades entre sí utilizando el código mostrado en la **Tabla 5**. La relación de las actividades se muestra en la **Figura 5**

**Tabla 5.** Código para análisis de distribución de la planta (Fuente: [26]).

Código	Relación	Código	Motivo
A	Absolutamente necesaria	a	Necesidad del proceso
E	Importante	b	Facilidad de acceso
O	Sin importancia	c	Intercambio de información
X	Rechazable	d	Economía de transporte
		e	Molestias y riesgos
		f	Higiene y limpieza

La distribución de las actividades que minimiza el cruce entre ellas se muestra en la **Figura 6**. Con la información obtenida se desarrolló el diagrama

conceptual del proceso usando la tecnología de aminólisis (**Figura 7**).

Actividades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Almacén (1)	-														
Selección (2)	Aa	-													
Molido (3)	O	Aa	-												
Lavado (4)	Aa	Ed	Aa	-											
Secado (5)	O	O	Eb	Aa	-										
Reactor (6)	Aa	O	O	O	Aa	-									
Precipitado (7)	Ea	O	O	O	O	Aa	-								
Filtración (8)	Ea	O	O	O	O	O	Aa	-							
Producto (9)	O	O	O	O	O	O	O	Aa	-						
Almacén 2 (10)	O	O	Ed	O	Eb	O	O	Eb	Aa	-					
Mezclador 1 (11)	Eb	O	O	O	O	O	O	O	O	Aa	-				
Mezclador 2 (12)	Eb	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	-			
Dosificador (13)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	Aa	Aa	-		
Descarga producto (14)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	Aa	-	
Tratamiento efluentes (15)	O	O	O	Ed	Ed	O	Ed	Ed	O	O	O	O	O	O	-
Comparación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Figura 5. Tabla relacional de actividades de la planta de asfalto modificado (Fuente: Propia)

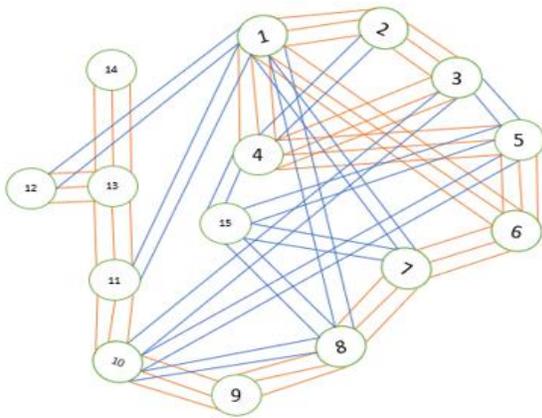


Figura 6. Distribución de actividades que minimizan el espaciamento entre las diferentes zonas de la planta(fuente propia)

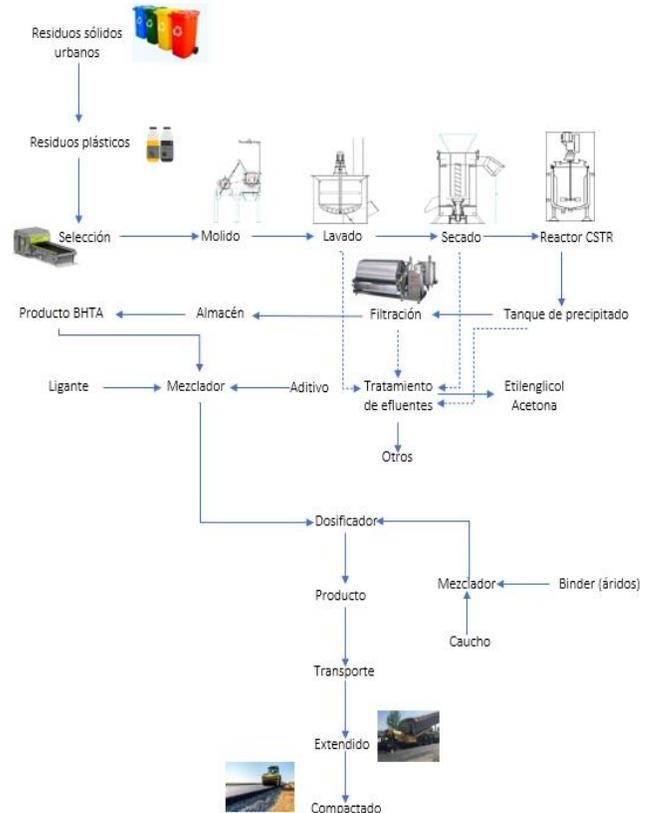
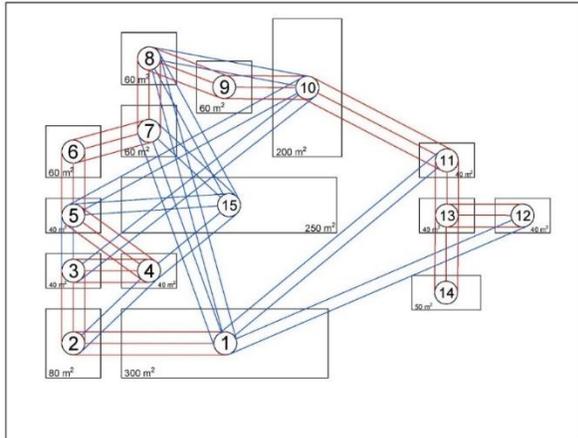


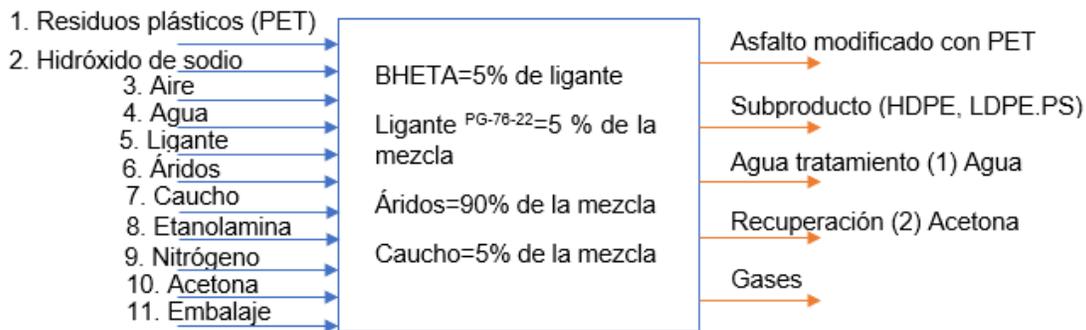
Figura 7. Diagrama conceptual (Fuente: Propia).



**Figura 8.** Distribución de las diferentes áreas de actividades en la planta de asfalto modificado (Fuente: Propia).

La distribución de tamaños preliminares para las actividades con sus respectivas áreas [27] se muestra en el diagrama de la **Figura 8**.

3) Estudio de factibilidad económica. El diagrama de entradas-salidas del proceso de asfalto modificado se presenta en la **Figura 9**



**Figura 9.** Entradas y salidas (Fuente: Propia).

Para una tonelada de asfalto modificado se obtuvieron los siguientes requerimientos de materias primas y

generación de productos presentados en la **Tabla 5**

**Tabla 5.** Balance de materia (Fuente: Propia).

Materia prima	Requerimiento
Residuos plásticos (PET)	2.72 kg
Hidróxido de sodio	0.955 kg
Aire	1 pie <sup>3</sup> /min
Agua	1 m <sup>3</sup>
Etanolamina	3.0326 kg
Nitrógeno	-
Acetona	18.3824 kg
Ligante	47.5 kg
Áridos	900 kg
Caucho	50 kg
Producto y subproductos	Generación
Asfalto modificado con PET	1 t
HDPE	-
LDPE	-

Los costos obtenidos a través de la consulta con diferentes proveedores se

presentan en la **Tabla 6** para la materia prima y en la **Tabla 7** para los productos

**Tabla 6.** Costos de materias primas para la producción de asfalto modificado basado en una tonelada de asfalto obtenido (Fuente: Propia).

Producto	Cantidad (unidad)	Precio (\$) **	Requisito (kg)	Costo (\$)
PET	1 kg	6.8	2.72	18.48
Hidróxido de sodio	1 kg	26.75	0.96	25.55
Aire	1 pie <sup>3</sup> /min	0.26	-	0.26
Agua	1 m <sup>3</sup>	5.75	-	5.75
Ligante	1 kg	12.61	47.5	599.05
Áridos (Arena / Agregado)	1 kg	1 / 4	540 / 360	540 / 1,440
Caucho	1 kg	7	50	350
Etanolamina	1 kg	107.10	3.03	327.51
Acetona	1 kg	44.08	18.38	-
			<b>TOTAL</b>	<b>3,306.59</b>

\*\*Fecha de consulta de materias primas: 14 de junio 2021.

**Tabla 7.** Costos de productos y subproductos en la producción de asfalto modificado (Fuente: [28]).

Producto	Cantidad	Precio (\$)
Asfalto modificado con polímero	1 ton	3,523.62
Subproductos HDPE / LDPE / PS/ PP	1 kg	8 / 5 / 5 / 11
<b>TOTAL</b>		<b>3,552.62</b>

El margen bruto para la producción de una tonelada por metro cúbico de asfalto resultante fue de \$246.03 *mxn*. Este valor se obtuvo usando la Ecuación

$$(1). MB = I - CMP \quad (1)$$

en donde *MB* es el margen bruto, *I* son los ingresos y *CMP* es el costo de materia prima.

El costo de capital de la planta se realizó para las tres etapas (reciclaje, asfalto modificado y producción de polímero). En la sección de reciclaje el precio de los equipos establecidos por el proveedor fue de \$4,435,176.93 *mxn* [30]. Aplicando el método de factores [29] que incluye los costos de instalación ( $f_{er}$ ), tubería ( $f_p$ ), instrumentación ( $f_i$ ), eléctricos ( $f_{el}$ ), civil ( $f_c$ ), estructuras y edificios ( $f_s$ ), así como revestimientos y

pinturas ( $f_i$ ), se obtuvo el costo de la sección de reciclaje a partir de la Ecuación (2), usando los valores para los factores indicados en Ecuación (3).

$$Ce = \sum C_{e,i,A} [(1 + f_p) + (f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_i)] \quad (2)$$

$$Ce = \$4,435,176.93 \text{ mxn} * [(1 + 0.6) + (0.5 + 0.2 + 0.3 + 0.3 + 0.2 + 0.1)] = \$14,192,566.18 \text{ mxn} \quad (3)$$

La sección de asfalto, incluyendo los equipos, tuberías, instrumentación, edificios, instalación, eléctricos, pinturas, se estimó por proveedor en \$6,508,184.94 *mxn* [31].

Por otra parte, para la producción de polímero se dimensionaron equipos de acuerdo con las especificaciones del proceso: un reactor químico (CSTR) de 69.56 m<sup>3</sup> y de un sistema de filtración de 0.625 m<sup>3</sup> en acero al carbono. Los costos

de estos equipos especiales fueron de \$6,814,187.7 mxn La Ecuación (4) incluyen los factores de la Ecuación (2) y el factor de cambio de material ( $f_m$ ). Finalmente, se obtuvo el costo de los equipos especiales aplicando el método de factores de la Ecuación (5).

$$C_e = \sum C_e [(1 + f_p)f_m + (f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_l)] \quad (4)$$

$$C_e = \$6,814,187.7 \text{ mxn} * [(1 + 0.6)1.3 + (0.5 + 0.2 + 0.3 + 0.3 + 0.2 + 0.1)] = \$25,076,210.74 \text{ mxn} \quad (5)$$

Los costos dentro de los límites de batería se calcularon a partir de la suma de los costos de capital de cada una de las secciones de la planta. Los costos fuera de los límites de batería comprenden el área fuera de la planta y se estimó por un factor de 0.4 de los costos dentro de los límites de batería. Por los costos de diseño e ingeniería su factor es 0.25, mientras que los costos por contingencia el factor es 0.1, ambos de la suma de los costos dentro y fuera de los límites de batería (**Tabla 8**).

**Tabla 8.** Costos fijos totales para la planta de asfalto modificado. (Fuente: Propia).

Parámetro	Total (peso mexicano)	Total (dólar)*
Costo dentro de los límites de batería	\$45,776,961.87	\$2,295,735.3
Costos fuera de los límites de batería	\$18,310,784.75	\$918,294.18
Costos de diseño e ingeniería	\$16,021,936.66	\$803,507.36
Costos por contingencia	\$6,408,774.66	\$321,402.94
<b>TOTAL</b>	<b>\$86,518,457.94</b>	<b>\$4,338,939.72</b>

\*Tasa de cambio al 14 de junio de 2021 (\$1 dólar equivale a \$19.94 mxn). Con la sumatoria de todos estos costos se obtuvo el costo fijo total de aproximadamente \$86,518,457.94 mxn.

4) Factibilidad Operacional. La estimación de la duración del proyecto y personal previsto se realizó tomando como base las siguientes heurísticas: a) En una planta típica de procesos químicos la duración de la fase de construcción es de aproximadamente el 80 % de la duración total del proyecto, desde el inicio de la ingeniería hasta la terminación de los trabajos de construcción. El 20 % restante es el

tiempo de espera necesario para las actividades de ingeniería y adquisición de material, equipos e insumos antes de que la etapa de construcción comience, b) Para fines de planificación inicial, el tiempo de espera no debe ser menor a tres meses, c) las horas de ingeniería disponibles suele ser entre el 30 y 40 % del total del proyecto. Siguiendo la metodología presentada por Navarrete & Cole [17] se determinaron las horas presentadas en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Desarrollo de las horas de duración del proyecto de la planta de asfalto modificado (Fuente: Propia).

Factor	Valor
Horas de construcción	36,639.94 horas
Horas de ingeniería	10,713.43 horas
Horas del diseño del proceso	1,285.61 horas
Duración del proyecto (construcción)	6.25 meses
Tiempo de entrega de Ingeniería	1.25 meses
Duración total del proyecto	8 meses
Horas de ingeniería para entrega	3,749.7 horas
Máximo personal	14 personas
<b>Fase uno (con cinco ingenieros de procesos)</b>	
Duración	1.71 meses
<b>Fase preliminar (con un ingeniero de proceso)</b>	
Duración	3.43 meses

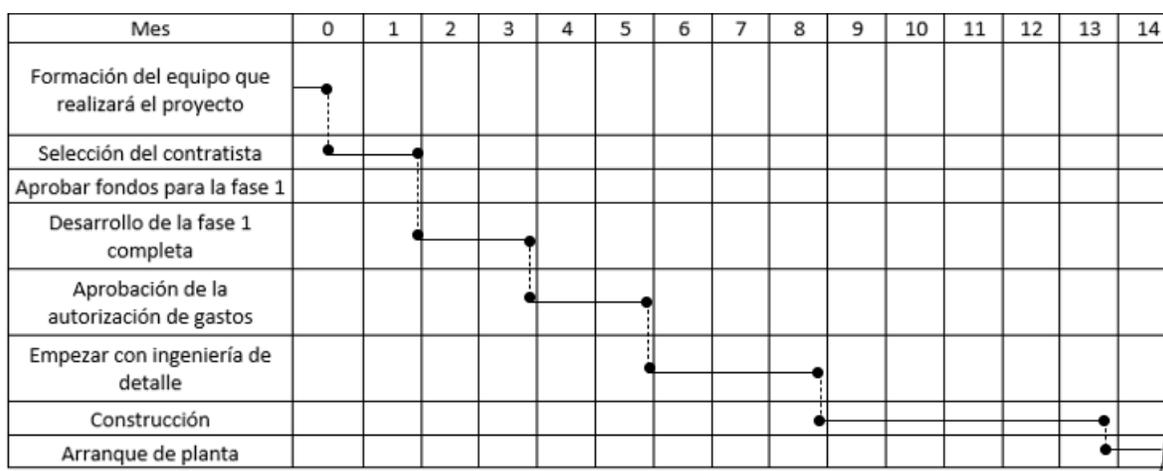
Las etapas y la duración del proyecto se presentan en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Duración total del proyecto por etapas (Fuente: Propia).

Etapas	Duración (meses)	Comentarios
Formación del equipo para el proyecto	0.5	Requerido por criterio
Selección del contratista	1.5	Grupo de diseño de la fase uno
Aprobar fondos fase 1	--	Autorización de gastos
Desarrollo de la fase 1 completa	1.71	
Aprobación de la autorización de gastos	2.0	Por procedimiento de compañías
Empezar con ingeniería de detalle	3.0	Tiempo mínimo de entrega
Construcción	5	
Arranque de planta	1.0	Por criterio
<b>TOTAL</b>	<b>14.72</b>	

En la **Figura 10** se muestra el diagrama PERT de los tiempos para el desarrollo del proyecto desde la parte inicial hasta

el arranque de la planta de producción de asfalto modificado.



**Figura 10.** Diagrama PERT para las diferentes etapas del proyecto (Fuente: Propia).

## DISCUSIONES

En la generación de residuos es relevante su gestión para evitar niveles de contaminación altos. De acuerdo con lo analizado los centros de acopio formales son ineficientes e insuficientes, ya que el valor potencial por atender es de 14.9 millones de toneladas al año de productos que pueden reciclarse. Mediante la factibilidad técnica se analizaron las ventajas y desventajas que presenta cada tecnología en cuanto a los factores seleccionados.

El diagrama de entradas y salidas representa en forma esquemática los insumos y productos de la planta lo que permite evaluar de manera práctica el margen bruto de la planta. En relación con el método de jerarquización analítica: se requiere que la distancia con los centros de acopio a la planta se tenga una distancia mínima debido a que se planea agregar más puntos estratégicos en la ciudad que permita la mayor capacidad de plásticos. En la disponibilidad de recursos para la localización de la planta se prefiere que se cuenten con todos los servicios básicos, la falta de alguno de ellos incrementaría el costo; la distancia de la población es necesario para una industria que genere materiales corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos e inflamables que en volúmenes determinados y de conformidad con su ubicación, pueden representar una amenaza para el equilibrio ecológico o el ambiente, por lo tanto, se prefiere contar con un radio de distancia mayor; en el caso con la distancia con la empresa de asfalto, se toma en consideración el proveedor más adecuado, ya que PEMEX suministra a empresas externas el asfalto por contar con los permisos para su distribución y venta; en la estrategia de comercialización se

requiere una mínima distancia para la conexión con la avenida principal de Villahermosa que conecta con las diferentes carreteras o con proveedores de transportes.

La planta se determinó en un área mínima de 5,000 m<sup>2</sup>, ya que se cuentan con 15 secciones del proceso productivo. Se considera requisito mínimo para un área de operación que excede los 925 m<sup>2</sup> el acceso posible de equipos de emergencia al área de trabajo por dos lados al menos. Además, el arreglo realizado es válido para estudios de análisis funcional de operatividad, índice de incendio y explosión, así como otros análisis para determinar la probabilidad de riesgo en la planta.

El estudio de factibilidad económica es una valoración de vital importancia, ya que se conoce la cantidad de recursos financieros que serán utilizados, sin embargo, esta estimación se llevó a cabo mediante una clasificación del costo de capital Clase 5, es decir con una estimación aproximada basada en costos de procesos similares, que no requieren información de diseño y con una incertidumbre de  $\pm 30\% - 50\%$ .

Las horas de construcción, de ingeniería para el diseño de proceso, ingeniería para entrega, duración total del proyecto, tiempo de entrega y el máximo personal son estimaciones a partir de ecuaciones en países desarrollados. Cabe mencionar que, si se quiere implementar en México, es necesario conocer los precios en moneda mexicana. La fase uno comprende el diseño mecánico detallando en los equipos el diseño estructural, civil, eléctrico, las especificaciones y el diseño de servicios auxiliares, mientras que la fase preliminar es el estudio de factibilidad presentado.

## CONCLUSIONES

El mercado del reciclaje cuenta con grandes retos para reducir significativamente la cantidad de plásticos. Se debe realizar acciones para equilibrar el consumo de plásticos. Por otra parte, a medida que la población aumenta, de esa misma manera se incrementa la generación de residuos sólidos urbanos.

Se ha descubierto que al mezclar el asfalto con PET en caliente (reciclaje mecánico) incrementa las propiedades reológicas de la mezcla, sin embargo, al procesar este polímero en una serie de operaciones unitarias (reciclaje químico) se ha demostrado que supera en algunas propiedades la eficiencia ante la reología de la mezcla a diferencia del reciclaje mecánico.

La infraestructura y equipos necesarios se estableció para un área de 5,000 m<sup>2</sup> para 15 secciones del proceso productivo que comprende desde el reciclaje de material reciclado, la potencialización de la molécula del PET, hasta el producto de la mezcla asfáltica modificada con polímero, además la localización estratégica para la construcción de la planta es en Prolongación de Ignacio Allende, Sabina, 86153, Villahermosa, Tabasco. Se determinó una estimación de costos de capital de clase 5 de \$4,338,939.72 dólares.

La duración total del proyecto es de 14.72 meses considerando la formación del equipo que realizará el proyecto, la selección del contratista, el desarrollo de la fase uno completa, la aprobación de la autorización de gastos, la ingeniería de detalle, construcción y arranque de planta. Aunque en este estudio de factibilidad se han considerado los aspectos básicos, es importante que se abarquen escenarios, tales como:

aspectos contractuales, normativos y técnicos complementarios, los cuales no se han abordado en este estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Posada-Bustamante B. (2012). La degradación de los plásticos, Revista Universidad Eafit, vol. 30, n<sup>o</sup> 94.
- [2] Abdul-Rahman W. M. N. W. y Abdul-Wahab A. F. (2013). Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt, ELSEVIER, vol. 53, pp. 124-128.
- [3] Lugo-Chávez E., Ramos-Cortez C. S., Cid-Bouchán A. K. y Quevedo-Mancilla M. V. (2019). Reciclar, la falacia de la industria en la lucha contra la contaminación plástica, Greenpeace.
- [4] FOREMEX, 2020. <https://www.foremex.com.mx/blog/v-alor-industria-reciclaje-mexico.html>. Fecha de consulta 27 de abril de 2021.
- [5] CIEL (2019). Plastic & Climate: The hidden costs of a plastic planet, ed., Washington, DC: Center for International Environmental Law.
- [6] Pola-Tellechea M. J. (2020), Diario Presente; Se ahoga Tabasco en basura plástica. <https://www.diariopresente.mx/tabasco/se-ahoga-tabasco-en-basura-plastica/230626>. Fecha de consulta 05 de junio de 2020.
- [7] SEMARNAT (2005). Más de 100 consejos para cuidar el ambiente desde mi hogar, Primera Edición ed., México D.F.: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- [8] Machsus M., Chen J. H., Hayati D. W., Khoiri M., Mawardi A. F. y Basuki R. (2021). Improvement for asphalt mixture performance using plastic bottle waste, *International Journal of Geomate*, vol. 20, nº 79, pp. 139-146.
- [9] Ahmad A. F., Razali A. R. y Razelan I. S. (2017). Utilization of polyethylene terephthalate in asphalt pavement: A review, *IOP SCIENCE*, vol. 203, pp. 1-8.
- [10] Ortiz-Mancera A. L. (2017), *Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible*, Bogotá: Facultad Tecnológica.
- [11] Mamani-Suaquita D. (2012), *Plastic roads construidas en la India reciclando residuos*, India.
- [12] VISE "Blog Vise". <https://blog.vise.com.mx/carreteras-hechas-de-pet>. Fecha de consulta 29 de marzo de 2021.
- [13] Anaya-Durand A. (2014). *Manual de Temas Selectos de Ingeniería de Proyectos*, Ciudad de México: Facultad de Química.
- [14] Sánchez-Guerrero G. N. (2003). *Técnicas participativas para la planeación*, México D.F.: Fundación ICA.
- [15] Muther R. (1968). *Planificación y proyección de la empresa industrial (Método S.L.P)*, Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A..
- [16] AACE Internacional (2005). *Sistema de clasificación para costos estimados*, AACE, inc.
- [17] Navarrete P. F. y Cole W. C. (2001). *Planning, estimating, and control of chemical construction projects*, Second ed., New York: Marcel Dekker, Inc.
- [18] Gobierno del Estado de Tabasco (2013). *Actualización del programa estatal para la prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos y manejo especial del estado de Tabasco*, SERNAPAM, Villahermosa, Tabasco.
- [19] Gobierno del Estado de Tabasco (2019). *Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024*, Tabasco: SEGOB Tabasco.
- [20] Garnica-Anguas P., Delgado-Alamilla H. y Sandoval-Sandoval C. D. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*, 272 ed., Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- [21] Flores-Fuentes S. (2012). *Ciencia UNAM*, Universidad Nacional Autónoma de México: DGDC UNAM [http://ciencia.unam.mx/leer/131/Asfalto\\_modificado\\_para\\_reducir\\_baches#:~:text=%E2%80%9Ccuando%20el%20pavimento%20tiene%20asfalto,%20C2%BAC%20sin%20sufrir%20deformaciones%20permanentes.%E2%80%9D](http://ciencia.unam.mx/leer/131/Asfalto_modificado_para_reducir_baches#:~:text=%E2%80%9Ccuando%20el%20pavimento%20tiene%20asfalto,%20C2%BAC%20sin%20sufrir%20deformaciones%20permanentes.%E2%80%9D). Fecha de consulta 12 de mayo de 2020.
- [22] Al-Sabagh A., Yehia F., Rabie A. y ElMetwally A. (2015). *Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate*, Egypt: ELSEVIER.
- [23] Abdel-Bary E. M., Farag R. K., Ragab A. A., Abdel-monem R. M., Abo-Shanab Z. L. y Saleh A. M. (2019). *Colloidal Stability and Dynamic Mechanical Properties of Asphalt modified with unsaturated polyester prepared from waste polyethylene terephthalate*, *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 62, nº 11, pp. 2003-2017.

- [24] Merkel D. R., Kuang W., Malhotra D., Petrossian G., Zhong L., Simmons K. L., Zhang J. y Cosimbescu L., Waste of PET chemical processing to terephthalic amides and their effect on asphalt performance, *Sustainable Chemistre & Engineering*, vol. 8, pp. 5615-5625.
- [25] Zhang H., Huang M., Hong J., Lai F. y Gao Y. (2020). Molecular dynamics study on improvement effect of bis(2-hydroxyethyl) terephthalate on adhesive properties of asphalt-aggregate interface, *ELSEVIER*, vol. 285, pp. 1-14.
- [26] Ramírez-Sandoval A. (2013). Cuadernillo de ejercicios de diagrama de recorrido y bloques, Estado de México.
- [27] Moran S. (2017). *Process Plant Layout*, 2da Edición ed., Oxford: ELSEVIER.
- [28] SCT (2020). Tabulador de precios referenciales a costo directo para construcción, modernización y conservación de obras de la infraestructura carretera 2020,» Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México.
- [29] Gonzalez-Brambila M. M. (2012). *Introducción a la ingeniería de procesos*, Ciudad de México: Limusa.
- [30] TEVA Distribuidora S.A. de C.V. (2021). Maquinaria para reciclaje de resina termoplástica PET, TEVA Distruidora, México.
- [31] Zhengzhou SINOSUN Machinery (2021). Alibaba.com, Manufacturer, Trading Company, [https://www.alibaba.com/product-detail/60-240tph-Colorful-Hot-Asphalt-Mixing\\_62124996512.html](https://www.alibaba.com/product-detail/60-240tph-Colorful-Hot-Asphalt-Mixing_62124996512.html). Fecha de consulta 12 de junio de 2021.
- [32] Greenpeace (2021). Datos sobre la producción de plásticos. <https://es.greenpeace.org/es/trabaja-mos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>. Fecha de consulta 31 de marzo de 2021.