

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Aprovechamiento químico de amidas alifáticas provenientes de la industria de reciclaje de llantas como estrategia para reducir el nylon residual

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Nayeska Aylin Cañarte Mera

Rosa Elina Chaguay Gómez

Tutor:

Ph.D. Joan Vera Villalobos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

A mis gatitos en el cielo y la tierra, son mi inspiración para seguir.

Nayeska Aylin Cañarte Mera

Dedico este trabajo a mis padres Antonio Chaguay y Lucía Gómez, que son mi pilar fundamental y mi orgullo. A mi hermana Tati, que es mi guía e inspiración constante. A mi José Luis, quien me acompañó en este camino con su amor paciente y sincero. A mis sobrinos, para que nunca dejen de soñar, ser felices y brillar. Y de una forma especial, le dedico este logro a la niña que nunca dejó de creer en ella y darlo todo, a la pequeña Eli, que hoy cumple este gran sueño más fuerte y valiente que nunca.

Rosa Elina Chaguay Gómez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi mamá y papá, por darme nuevas oportunidades y enseñarme que todo se puede lograr. A mis hermanas, por su apoyo y amor sin importar nada. A mi familia, por siempre estar pendiente de mis pasos. A mis segundos papás, por recibirme en su hogar y hacerme sentir como uno de ellos. A mis amigos, que estarán para siempre en mi corazón y especialmente a Elu por todos estos años de carrera.

Nayeska Aylin Cañarte Mera

Agradezco a Dios, por permitirme culminar con su bendición esta etapa universitaria. Al Ph.D. Joan Vera, por ser nuestra guía y sin duda el mejor tutor. A mis padres que con sus oraciones y enseñanzas me sostienen. A mi hermana, mi cuñado y mis sobrinos, por ser mi hogar incondicional en estos años. A mi amado José Luis, por compartir conmigo mis días llenos de tantas emociones y tener siempre el abrazo perfecto. A mi amiga incondicional Vanessa, que nunca deja de motivarme. A mi amiga y compañera Nayeska por su esfuerzo y esmero en estos meses.

Rosa Elina Chaguay Gómez

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Nayeska Aylin Cañarte Mera* y *Rosa Elina Chaguay Gómez* y damos (nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Nayeska Aylin Cañarte
Mera



Rosa Elina Chaguay
Gómez

EVALUADORES

.....
Msc. Suanny Mosquera

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ph.D. Joan Vera

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La industria de reciclaje de llantas genera tres principales productos: acero, caucho y material textil. Este último es considerado un reto que enfrenta la comunidad científica con el fin de recuperar materia prima para la industria. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema experimental de despolimerización del nylon residual del material textil de las llantas mediante hidrólisis ácida que permita su reciclaje. La despolimerización de este material constituye un aporte al proceso productivo del país, debido al lento desarrollo de la industria en el sector petroquímico. El proyecto se efectuó a escala de laboratorio considerando dos sistemas de reacción: electrotérmico y microondas. Se realizaron 3 ensayos para el sistema electrotérmico a 160.00°C por 24h, empleando HCl 6N y zeolita mordenita como catalizadores. En el sistema microondas se realizaron 12 ensayos con HCl 6N, variando potencia y tiempo. Se utilizó nylon puro para validar la eficiencia de ambos sistemas a las condiciones planteadas. Los experimentos con nylon puro reportaron valores mayores a 90.00%. Se propuso, además, un método experimental para el aislamiento del monómero diamina. En el sistema electrotérmico se demostró que la zeolita aumenta hasta 11.71% el rendimiento y el nylon se despolimeriza aproximadamente en su totalidad. Las reacciones por microondas muestran menor rendimiento comparado con el otro sistema. En ambos casos se obtiene una despolimerización parcial de la muestra bajo diferentes condiciones facilitando la búsqueda de soluciones para disminuir la contaminación causada por la acumulación del nylon y para el desarrollo local de la industria petroquímica.

Palabras Clave: Despolimerización, nylon 6,6, hidrólisis ácida, poliamidas, síntesis hidrotérmica.

ABSTRACT

The tire recycling industry generates three main products: steel, rubber, and textile material. The latter is considered a challenge faced by the scientific community to recover raw material for the industry. The main objective of this work is to develop an experimental system of depolymerization of the residual nylon from the textile material of tires by acid hydrolysis that allows its recycling. The depolymerization of this material constitutes a contribution to the productive process of the country, due to the slow development of the industry in the petrochemical sector. The project was carried out at laboratory scale considering two reaction systems: electrothermal and microwave. Three experiments were carried out for the electrothermal system at 160.00°C for 24h, using 6N HCl and mordenite zeolite as catalysts. In the microwave system, 12 experiments were carried out with 6N HCl, varying power and time. Pure nylon was used to validate the efficiency of both systems at the proposed conditions. The experiments with pure nylon reported values higher than 90.00%. An experimental method for the isolation of the diamine monomer was also proposed. In the electrothermal system it was demonstrated that zeolite increases up to 11.71% the yield and nylon depolymerizes approximately in its totality. The microwave reactions show lower yields compared to the other system. In both cases a partial depolymerization of the sample is obtained under different conditions, facilitating the search for solutions to reduce the contamination caused by the accumulation of nylon and for the local development of the petrochemical industry.

Keywords: Depolymerization, nylon 6,6, acid hydrolysis, polyamides, hydrothermal synthesis.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Antecedentes	4
1.4.2 Bases teóricas para despolimerización de nylon 6,6	6
1.4.2.1 Despolimerización de poliamidas	6
1.4.2.2 Hidrólisis ácida	6
1.4.2.3 Efecto microondas.....	7
1.4.2.4 Degradación del caucho.....	8
1.4.2.5 Zeolita ácida	8
1.4.2.6 Caracterización de polímeros.....	9
Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	9
Análisis por termogravimetría (TGA)	9
CAPÍTULO 2.....	10
2. Metodología	10
2.1 Caracterización del sustrato	10
2.2 Experimentación: Sistema de hidrólisis electrotérmica.....	11
2.3 Experimentación: Sistema de hidrólisis asistida por microondas	12
2.4 Tratamiento de reacción para estimación de rendimiento.....	13
2.5 Aislamiento de monómeros	13

2.6	Caracterización de monómeros.....	14
2.6.1	Punto de fusión	14
2.6.2	FTIR.....	15
2.7	Análisis tecno económico	15
CAPÍTULO 3.....		17
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	17
3.1	Caracterización del sustrato	17
3.1.1	Limpieza del residuo textil.....	17
3.1.2	Análisis termogravimétrico	17
3.1.3	FTIR.....	18
3.2	Sistema de hidrólisis electrotérmica	19
3.3	Sistema de hidrólisis asistida por microondas.....	20
3.4	Aislamiento de monómeros	22
3.5	Caracterización de monómeros.....	22
3.5.1	Punto de fusión	22
3.5.2	FTIR.....	22
3.6	Diseño del proceso.....	23
3.7	Análisis tecno-económico.....	24
3.7.1	Mercado.....	24
3.7.2	Costos de equipos	25
3.7.3	Costos variables y fijos	26
3.7.4	Flujo de caja.....	26
CAPÍTULO 4.....		28
4.	Conclusiones y recomendaciones	28
4.1	Conclusiones.....	28
4.2	Recomendaciones.....	29
GLOSARIO.....		31

BIBLIOGRAFÍA.....	32
APÉNDICE	35

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LEMAT	Laboratorio de Ensayos de Materiales
LAQUINS	Laboratorio de Análisis Químico Instrumental

SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de hidrógeno
W	Vatio
°C	Grado Celsius
GHz	Gigahercio
Ton	Tonelada
kg	Kilogramo
g	Gramo
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mm	Milímetro
h	Hora
min	Minutos
cm ⁻¹	Centímetro recíproco - Unidad de medida del número de ondas
M	Concentración Molar
N	Concentración Normal
PA66	Poliamida 66
TGA	Análisis termogravimétrico
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier
ATR	Reflectancia total atenuada
T _{pm}	Temperatura de punto de fusión
T _g	Temperatura de transición vítrea
<i>n</i>	Número de monómeros en un polímero
HMDA	Hexametilendiamina
Si/Al	Sílice/Alúmina
HCl	Ácido clorhídrico
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
NaOH	Hidróxido de sodio
VAN	Valor Actual Neto

TMAR	Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento
TIR	Tasa Interna de Retorno

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mecanismo de reacción de despolimerización de nylon 6,6.....	7
Figura 2.1 Etapas de la metodología	10
Figura 2.2 Procedimiento experimental de aislamiento y purificación de monómeros ..	14
Figura 3.1 Resultado de TGA del residuo textil derivado del reciclaje de llantas	18
Figura 3.2 Resultado de FTIR del residuo textil derivado del reciclaje de llantas.....	19
Figura 3.3 Evidencia de residuos de reacción sólidos filtrados. Nylon 6 vs. Nylon 6,6..	20
Figura 3.4 Cristales aislados de la disolución monomérica	22
Figura 3.5 Resultado de FTIR de los cristales aislados.....	23
Figura 3.6 Diagrama de proceso de planta de reciclaje de nylon	23
Figura 3.7 Curva de estimación de recuperación de inversión	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Ensayos experimentales sistema electrotérmico	12
Tabla 2.2 Condiciones de operación del sistema electrotérmico experimental	12
Tabla 2.3 Ensayos experimentales sistema microondas	12
Tabla 2.4 Condiciones de operación del sistema microondas experimental	13
Tabla 2.5 Rangos de puntos de fusión y ebullición teóricos de hexametildiamina	14
Tabla 3.1 Resultados de rendimiento por conversión sistema electrotérmico	20
Tabla 3.2 Resultados de rendimiento por conversión sistema microondas	21
Tabla 3.3 Demanda y producción del sistema de despolimerización de Nylon reciclado	24
Tabla 3.4 Costo de equipos sistema microondas y electrotérmico	25
Tabla 3.5 Costo anual de materias primas	26
Tabla 3.6 Comparación de variables económicas de ambos sistemas	27

ÍNDICE DE APÉNDICE

APÉNDICE A

Apéndice A.1 Resultado de DSC de pellet de nylon puro proporcionado por Laboratorio de Ensayos de Materiales LEMAT	36
Apéndice A.2 Datos teóricos de nylon puro – Poliamida 6 (Ehrenstein et al., 2008)	37

APÉNDICE B

Apéndice B.1 Depreciación anual de equipos – Sistema electrotérmico	38
Apéndice B.2 Tabla de amortización – Sistema electrotérmico	38
Apéndice B.3 Salario de personal – Sistema electrotérmico	38
Apéndice B.4 Flujo de caja del proyecto – Sistema electrotérmico	39

APÉNDICE C

Apéndice C.1 Depreciación anual de equipos – Sistema microondas	40
Apéndice C.2 Tabla de amortización – Sistema microondas	40
Apéndice C.3 Salario de personal – Sistema microondas	40
Apéndice C.4 Flujo de caja del proyecto – Sistema microondas	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las llantas o neumáticos son reconocidas como una de las mejores invenciones del hombre a lo largo de su historia. Las primeras llantas estaban hechas de madera o metal, lo que le brindaba la principal característica de duración, aunque restaban comodidad. La evolución comenzó cuando se le insertó hule en la estructura inicialmente metálica cuando se descubrió el proceso de vulcanización. Los siguientes modelos de los neumáticos estaban compuestos por hule sólido. En 1888, se insertó hule neumático, el cual utilizaba hule y aire encapsulado. La mejora de este modelo se evidenció en la disminución de la vibración y la mejora de la tracción.

Actualmente, las llantas convencionales están compuestas por 3 materias primas: acero, material textil y caucho. Cada uno de estos componentes ofrece diferentes características al neumático. El metal proporciona firmeza, dureza y durabilidad. El caucho garantiza la movilidad eficiente y permite amortiguar la estructura. Mientras que, el material textil en forma de cuerdas está compuesto a su vez por nailon, rayón o poliéster; ya que, proporcionan la resistencia debida a los neumáticos brindando una mayor vida útil a la banda de rodamiento (El Comercio, 2012).

La búsqueda de soluciones que brinden mayor tiempo de vida útil y resistencia a las llantas trae consigo otros inconvenientes, como la acumulación excesiva de los neumáticos y el alargamiento del tiempo de vida de las llantas una vez han cumplido su función. De este modo, surgen las empresas recicladoras de llantas, las cuales tienen un papel fundamental dentro del proceso productivo, estas aprovechan la extracción de materiales como el metal y el caucho para devolverlos en la cadena de suministro. No obstante, el material textil formado principalmente de nylon no tiene una funcionalidad designada y se acumula excesivamente o requiere una gestión extra para su eliminación.

El desarrollo del presente trabajo tiene como finalidad establecer el contexto y problemática actual acerca del desaprovechamiento de nylon residual proveniente de la industria del reciclaje de llantas. El siguiente capítulo proporciona información

relacionada con la descripción, justificación y planteamiento del problema; además, aporta bases teóricas para fundamentar la investigación.

1.1 Descripción del problema

La industria del reciclaje de llantas genera principalmente tres productos que son empleados en distintos campos como el caucho, el acero y el material textil. El caucho tiene usos en la elaboración de productos como canchas sintéticas, adoquines y otras estructuras de interés. El acero es comercializado en las fundiciones para múltiples aplicaciones en construcción, moldeado, entre otras. El material textil por su parte es un reto para el proceso de reciclado y representa un problema en el entorno de trabajo por su tamaño y ligereza (Rodríguez, 2019).

La fibra textil se encuentra constituida principalmente por nylon (poliamidas), su relevancia se debe a que es un tercer producto del reciclaje de llantas que suele tratarse como un pasivo ambiental o se utiliza como combustible sólido recuperado en la industria cementera. Esta última alternativa representa altos costos de energía, lo cual desarrolla la necesidad de acelerar su introducción al proceso productivo del país mediante nuevas alternativas.

La industria de reciclaje de llantas se muestra cada vez más fuerte y hay un mayor número de empresas en este sector. En España, la empresa SIGNUS Ecovalor se encarga de gestionar neumáticos fuera de uso. En el 2016 la cantidad de neumático fuera de uso fue de 189 259 toneladas y de este total se destinaron 23 629 para su reutilización en el desarrollo de nuevos productos que emplean esta materia prima (Pérez & Saiz, 2018). Por su parte, en la industria ecuatoriana, una empresa dedicada al proceso de reciclaje de llantas es un referente que abarca una importante área de este mercado y concentra otras actividades como la venta de caucho y consultorías de gestión de desechos será objeto de estudio.

En la empresa recicladora de llantas ecuatoriana, la aceleración productiva dentro de su planta de operación ha originado la acumulación de residuos y subproductos entre los cuales se encuentra mayormente el nylon mezclado con los remanentes del proceso. La gestión adoptada por la empresa revela un plan de acción que requiere un valor

agregado para su almacenamiento y eliminación de los desechos puesto que generalmente se utiliza como combustible alternativo en la industria cementera, bajo la desventaja de ser un proceso contaminante o requiere la participación de otra entidad para eliminar tales residuos de forma definitiva.

1.2 Justificación del problema

La acumulación de residuos industriales ocasiona problemas ambientales para zonas urbanas y rurales, debido a su impacto a distintos recursos naturales. Principalmente, tales problemáticas surgen por los residuos inorgánicos con un tiempo de vida extenso, sin una funcionalidad específica y controlados por las diferentes entidades regulatorias. Un ejemplo se evidencia en la industria automotriz, las piezas y accesorios vehiculares mantienen un tiempo de uso amplio y están designadas a continuar dentro del proceso productivo mediante el reciclaje. En particular, los neumáticos están sujetos a tiempos de cambio muy cortos y su reutilización se acelera directamente con el crecimiento de la industria automotriz. No obstante, el aprovechamiento de este residuo genera un posterior subproducto sin aplicación aparente (Marconi et al., 2018).

El desecho de nylon de la industria de reciclaje de llantas constituye un pasivo ambiental que necesita ingresar al proceso productivo del Ecuador. A partir de este residuo textil se pueden obtener productos de gran valor aplicables en diversos campos. La reacción de despolimerización de las poliamidas genera diaminas y ácidos dicarboxílicos constituyentes (Chanda, 2021). Usualmente estos productos son requeridos en la manufactura de nuevas poliamidas o en otros sectores de la industria como en la formación de resinas, polímeros y pinturas.

En este sentido, el desarrollo del presente proyecto da lugar a la apertura de procesos de tratamiento de residuos de nylon provenientes de la industria del reciclaje de llantas como alternativa a ser comercializada. Considerando que, en el territorio existe un número importante de empresas que se dedican al reciclaje de llantas, resulta de gran interés desarrollar estrategias locales que permitan gestionar la problemática y generar soluciones integrales que contribuyan a la industria y al medio ambiente.

Este trabajo corresponde al sector productivo de industrias y manufactureras, además, forma parte del fundamento de economía circular y promueve el desarrollo de la química verde. Esta última mantiene un enfoque primordial en dos de sus doce principios: evitar los residuos, y usar y generar sustancias que posean poca o ninguna toxicidad. Además, se vincula con el noveno objetivo de desarrollo sostenible, debido a que abarca la implementación de infraestructuras resilientes, promueve la industrialización inclusiva y sostenible, y fomenta la innovación. De igual forma también se enfoca en el doceavo objetivo, que garantiza las pautas de consumo y de producción sostenibles (Grupo FARO, 2019).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de despolimerización del residuo textil de nylon por hidrólisis ácida para la aplicación en la industria de reciclaje de llantas.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las condiciones de operación basadas en el diseño experimental para la obtención de monómeros bases con aplicaciones industriales.
2. Comparar los rendimientos obtenidos de la reacción de hidrólisis en medio electrotérmico con respecto a los resultados de la reacción asistida por microondas.
3. Realizar análisis tecno-económico del sistema de despolimerización de poliamidas para la evaluación de la viabilidad del proyecto a escala industrial.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

En el auge económico de la población mundial, la masiva fabricación de neumáticos y la complejidad de gestionarlos una vez que ha terminado su vida útil constituye un importante problema ambiental. Un gran porcentaje de este desecho se deposita en vertederos, se quema directamente produciendo gases nocivos, o son acumulados sin ningún control en distintos espacios provocando focos de infección. En este contexto, la importancia de las industrias de reciclaje de llantas es cada vez mayor. Aunque en las

plantas de procesamiento solo se consideran al caucho y acero como los productos de valor comercial, el nylon 6,6 es un componente textil presente en aproximadamente 5% del neumático. Este último producto puede recuperarse para ser utilizado en industrias plásticas, textiles y de pinturas.

El proceso de reciclaje de llantas inicia con la recolección de los neumáticos junto con la limpieza de estos, para posteriormente ser separadas dada las propiedades y características de los diferentes tipos de llantas del mercado. Luego, son llevadas a cortadoras y trituradoras con la finalidad de particular el material. Por consiguiente, se separan los componentes principales por granulometría para el caucho y el uso de imanes para los metales, donde el residuo del proceso se compone mayormente de fibra de nylon y un remanente de los otros materiales (Apaza, 2017).

Se conoce en términos generales que existen métodos mecánicos y químicos para la recuperación del valor económico de los desechos de nylon. El reciclaje químico tiene tres formas de llevarse a cabo. La primera es mediante la despolimerización y obtención de sus monómeros u oligómeros útiles. Segundo, se puede usar solventes para la extracción de polímeros. Por último, el otro método consiste en la producción de mezclas termoplásticas (Patil & Madhamshettiwar, 2014).

Las investigaciones de distintos autores tienen un enfoque prioritario en poliamida 6 y señalan que el reciclaje de este polímero es eficiente si se descompone en sus monómeros bases mediante despolimerización por hidrólisis que luego son purificados y comercializados. Este proceso se lleva a cabo generalmente a condiciones de alta temperatura y presión en presencia de catalizadores (Shukla et al., 2006).

El artículo presentado por Češarek et al. (2020) plantea las bases de un proceso de reciclaje químico para poliamidas alifáticas asistido por microondas. En este, se analiza la reacción de despolimerización del nylon 6,6 común y también en presencia de aditivos como carbono y fibras de vidrio junto con las condiciones de reacción óptimas para la obtención de un mayor rendimiento. Por otro lado, Patil & Madhamshettiwar (2014) plantea un diseño experimental de hidrólisis convencional y las condiciones óptimas de reacción, considerando la variación de distintos valores con respecto al rendimiento del producto.

1.4.2 Bases teóricas para despolimerización de nylon 6,6

1.4.2.1 Despolimerización de poliamidas

La despolimerización es la reacción inversa a la polimerización y consiste en la obtención de monómeros constituyentes a partir de un polímero base. La poliamida 66 se obtienen mediante polimerización por condensación del ácido adípico y la hexametildiamina. Este tipo de polimerización está basado en un mecanismo de reacción consecutivo en donde los monómeros se reagrupan simultáneamente y se conoce también como polimerización de crecimiento por pasos. La reacción de despolimerización es dependiente del tipo de polimerización inicial, dado a que los polímeros de adición se descomponen térmicamente y los polímeros de condensación requieren un agente químico para descomponerse en sus monómeros constituyentes (Ramírez et al., 2013).

1.4.2.2 Hidrólisis ácida

Se denomina hidrólisis al proceso de ruptura de una molécula de agua, mediante reacciones químicas. Este proceso depende de la concentración de grupos hidroxilos o protones en el medio, presentes en la sustancia utilizada para la separación molecular. La concentración define el tipo de hidrólisis: ácida, neutra o básica. La hidrólisis ácida es un proceso de ruptura molecular a partir de soluciones en agua con un pH por debajo de 7. Se caracterizan por presentar neutralización completa de una base débil con un ácido fuerte como cloruros, nitratos, percloratos, entre otros (González, 2009).

El mecanismo de reacción de la despolimerización de nylon (Figura 1.1) inicia con la adición de un agente catalizador que permite la ruptura de moléculas de agua con hidrógenos activos que protonan el grupo carbonilo debido a su alta electronegatividad. La protonación del oxígeno causa una polaridad hacia el oxígeno protonado y un debilitamiento del doble enlace del grupo carbonilo. La desviación de los electrones y posterior ruptura del enlace carbonilo permite la formación de un carbocatión. Consecuentemente, las moléculas de agua del medio son atraídas al centro positivo del carbono, formando un enlace parcial con el carbocatión y un debilitamiento del enlace amina. Dado a que se encuentra el oxígeno cargado positivamente, el hidrógeno es fácilmente abstraído por el nitrógeno adyacente. En este punto, se produce la ruptura del enlace y al mismo tiempo existe un reordenamiento en el alcohol geminal que fácilmente libera el protón para dar lugar al diácido. La reacción de despolimerización sucede

simultáneamente para n cantidad de monómeros hasta la formación una amina (HMDA) y el diácido (ácido adípico).

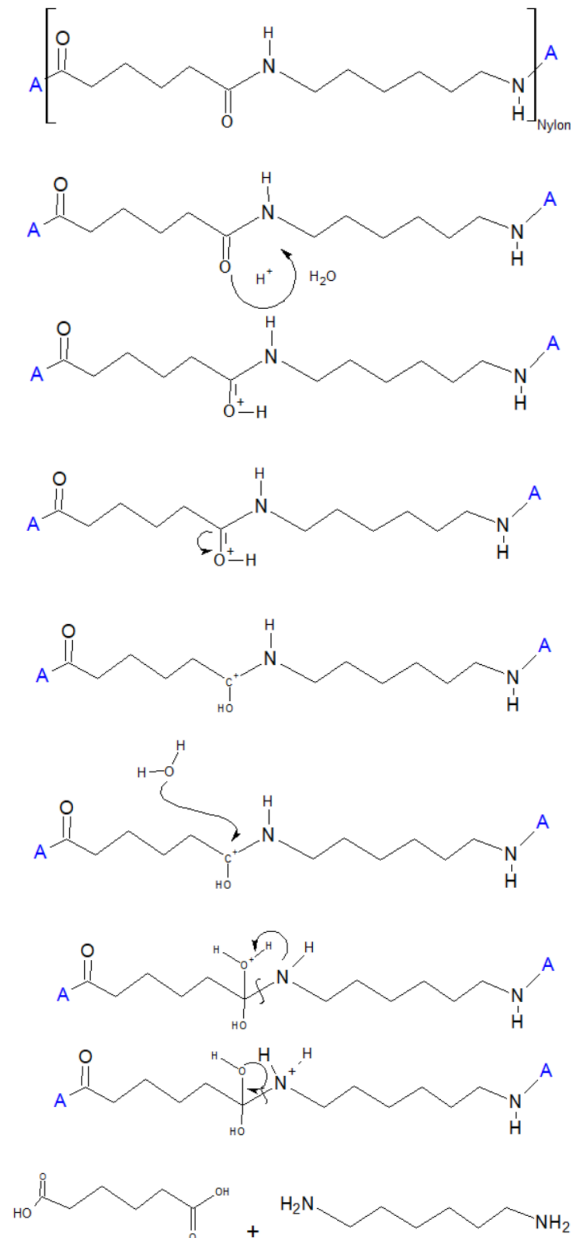


Figura 1.1 Mecanismo de reacción de despolimerización de nylon 6,6.

Fuente: (Kumar et al., 2020)

1.4.2.3 Efecto microondas

Las ondas electromagnéticas transportan simultáneamente ondas eléctricas y magnéticas producidas por una carga eléctrica en movimiento. Los microondas comprenden un rango en el espectro electromagnético que va desde 0.3000 GHz a 300.0 GHz (Castillo et al., 2014).

En los procesos químicos las microondas no afectan la estructura molecular de los compuestos, esto se debe a que la energía que irradian es baja en comparación con la energía de los enlaces químicos. El efecto microondas consiste, por lo tanto, es el incremento de la energía cinética. El resultado es un calentamiento más eficiente en comparación con los métodos convencionales. Las principales características del calentamiento por microondas son:

- Radiación penetrante: Energía transmitida de forma directa a nivel molecular. La profundidad de transmisión alcanzada varía de factores como propiedades dieléctricas y magnéticas, frecuencia y potencia del equipo, temperatura, entre otros.
- Calentamiento rápido y selectivo: Las reacciones pueden ser entre 10 y 1000 veces más rápidas que los procesos convencionales y no todos los compuestos son capaces de acoplarse a los campos electromagnéticos de las microondas y necesitan en esos casos de un susceptor (Prado & Morán, 2011).

1.4.2.4 Degradación del caucho

El caucho es un compuesto natural o sintético formado por materiales poliméricos amorfos, los cuales debido a su alta capacidad elástica y resistente pueden ser elongados hasta 1000 veces su tamaño. Entre sus principales propiedades se resaltan la elasticidad, resistencia mecánica y estabilidad térmica. El caucho se descompone en el intervalo de temperatura de 300.0°C a 450.0°C, y sufre una degradación completa cuando alcanza los 480.0°C, dado a que al sobrepasar esa temperatura lugar a reacciones de pirólisis (Pizarro, 2013).

1.4.2.5 Zeolita ácida

La zeolita es un mineral natural de alto valor por las diferentes propiedades que proporciona. La zeolita ácida posee propiedades específicas y mantiene un amplio uso como catalizador de reacciones ya que tiende a comportarse como un ácido de Lewis. Este comportamiento se produce por su capacidad de aceptación de electrones, y principalmente se debe al contenido Si/Al, la cual es directamente dependiente de la acción catalítica del medio. (Moliner, 2014)

1.4.2.6 Caracterización de polímeros

La caracterización de materiales poliméricos es una etapa preliminar que permite comprender las propiedades mecánicas, físicas y químicas a nivel macroscópico, de esta forma, es posible identificar la estructura y organización de las macromoléculas.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Este método de caracterización es ampliamente usado para identificar compuestos de carácter orgánico e inorgánico, a través del estudio de las interacciones entre el campo magnético en la región del infrarrojo y la materia (Charles et al., 2009). La espectroscopía infrarroja proporciona información detallada de la estructura mediante las frecuencias de vibración características de los grupos presentes en la molécula. Los espectros permiten localizar bandas típicas de grupos funcionales específicos, lo cual permite determinar las estructuras moleculares (Ceriotti et al., 2014).

Análisis por termogravimetría (TGA)

TGA es un método termo-analítico que estudia el cambio de masa del material en función de la temperatura, para determinar las propiedades térmicas de los elastómeros. Este cambio puede ocurrir en una atmósfera dinámica o estática con un caudal determinado en presencia, generalmente, de gases como nitrógeno, aire o dióxido de carbono (Charles et al., 2009). La temperatura del punto de fusión (T_{pm}) y temperatura de transición vítrea (T_g) son propiedades importantes para determinar el polímero correspondiente. En caso del nylon 6,6, la temperatura de fusión se encuentra en un rango entre 225.0°C y 165.0°C, mientras que la temperatura T_g se estima como 90.00/39.00/-6.000°C (Ehrenstein et al., 2008).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La investigación tuvo como foco principal determinar información sobre la despolimerización por procesos de hidrólisis catalítica de nylon 6 y nylon 6,6 en sistemas electrotérmicos y asistidos por microondas. En el presente trabajo se amplía la metodología propuesta por Patil y Madhamshettiwar (2014) para despolimerización de residuos de poliamida 6,6 en un proceso de hidrólisis electrotérmica. Además, se incluye la información metodológica presentada en el estudio científico publicado por Češarek et al. (2020) para despolimerización de poliamidas en sistemas asistidos por radiación microondas, incluso en presencia de aditivos. Esto asegura que los tiempos de reacción en este sistema disminuyen significativamente cuando se comparan con el método convencional.

Los principales parámetros determinados en anteriores investigaciones se consideraron para el diseño experimental, estos son: la temperatura, potencia, tiempo de reacción y selección de catalizadores ácidos por su incidencia en el rendimiento de reacción. La metodología aplicada para la evaluación del diseño experimental de despolimerización de material textil de la industria de reciclaje de llantas por hidrólisis catalítica está compuesta de siete etapas que se detallan en este capítulo.

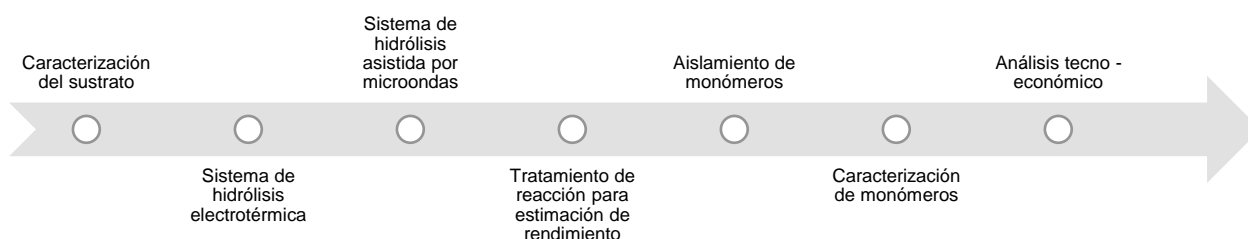


Figura 2.1 Etapas de la metodología

2.1 Caracterización del sustrato

El diseño experimental del presente proyecto consideró como punto de partida la caracterización preliminar de la fibra textil para identificar el tipo de poliamida, la cual podía ser poliamida 6, poliamida 66 o en su defecto una mezcla de polímeros.

- Inicialmente, se midió en un recipiente 50.00 g de la muestra resultante del proceso de reciclaje de llantas.
- La muestra se colocó en el nivel superior de una zaranda vibratoria de laboratorio por 40 minutos. Se usaron dos niveles de mallas metálicas, de 2.000 mm y 1.400 mm.
- Se pesó en una balanza la cantidad de muestra obtenida del nivel superior luego del tiempo transcurrido.
- Se efectuó la extracción manual de la mayor cantidad de partículas de caucho y otros remanentes que se encontraban aún en la muestra.
- Luego, se colocó la muestra en un vidrio reloj para medir el peso.
- La cantidad de material residual obtenido se sumergió en tolueno a 100.0°C para disolver parte del caucho presente.
- Se separó manualmente el residuo textil con la ayuda de una espátula y se llevó a la estufa por una hora a temperatura de 110.0°C.
- La muestra resultante se caracterizó por análisis termogravimétrico y espectroscopía infrarroja.

2.2 Experimentación: Sistema de hidrólisis electrotérmica

El proceso experimental contempló una fase de ensayos preliminares adicionales a los descritos en la Tabla 2.1. Se definió un tiempo de reacción de 2 horas a temperatura de 80.00°C, considerando una relación de 60:1 (mg de PA 66:mL de ácido). Además, se contempló el uso de H₃PO₄ como catalizador ácido en solución y zeolita mordenita en menor porcentaje.

Finalmente, se fijaron en el rediseño experimental un total de 3 ensayos por duplicado para este sistema, uno de ellos con nylon 6 puro en forma de pellets, caracterizado previamente y proporcionado por el Laboratorio de Ensayos de Materiales LEMAT ESPOL (Apéndice A). El nylon puro fue empleado como referencia para la estimación del rendimiento por conversión. La reacción se llevó a cabo en un reactor autoclave de síntesis hidrotérmica de acero inoxidable con reservorio interno de teflón de 25.00 mL, el cual se colocó en una estufa de la marca Memmert por un tiempo fijo. Además, la relación usada fue de 12.50 mg de PA 66 en 1.000 mL de solución ácida para todos los experimentos. Se tomó en consideración que, al ser un sistema cerrado no se

recomienda operar con más de 1/3 de su capacidad para evitar explosiones debido a la presión ejercida.

Tabla 2.1 *Ensayos experimentales sistema electrotérmico*

Ensayo	Mezcla de reacción
1	Nylon 6 puro + solución de HCl
2	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl
3	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl + zeolita

Tabla 2.2 *Condiciones de operación del sistema electrotérmico experimental*

Parámetro	Condición de reacción
Masa de sustrato (nylon)	0.0875 g
Catalizador ácido ^a	HCl HCl + zeolita
Concentración de solución ácida	6N
Volumen de solución ácida	7.000 mL
Tipo de zeolita	Mordenita
Masa de zeolita	50% del sustrato (g)
Temperatura de reacción	160.0 °C
Tiempo de reacción	24 horas

Nota: (a) Parámetro variable. Depende del número de ensayo (Ver tabla 2.1)

2.3 Experimentación: Sistema de hidrólisis asistida por microondas

El sistema de reacción estaba compuesto por un microondas casero modificado de la marca Tekno de 1000 W con un sistema de reflujo adaptado. Se colocó dentro del equipo un balón de destilación de fondo plano con la mezcla de reacción. Por cada 1.000 mL de solución ácida, se colocó en 12.50 mg de material textil reciclado o puro según se definió para cada ensayo. Se fijaron condiciones de tiempo y potencia. Todos los ensayos experimentales se realizaron por duplicado para determinar la precisión experimental en el análisis de resultados.

Tabla 2.3 *Ensayos experimentales sistema microondas*

Ensayo	Mezcla de reacción	Potencia Tiempo
1	Nylon 6 puro + solución de HCl	500 W 30 min
2	Nylon 6 puro + solución de HCl	500 W 60 min
3	Nylon 6 puro + solución de HCl	500 W 90 min
4	Nylon 6 puro + solución de HCl	700 W 30 min
5	Nylon 6 puro + solución de HCl	700 W 60 min

6	Nylon 6 puro + solución de HCl	700 W 90 min
7	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	500 W 30 min
8	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	500 W 60 min
9	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	500 W 90 min
10	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	700 W 30 min
11	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	700 W 60 min
12	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	700 W 90 min

Tabla 2.4 *Condiciones de operación del sistema microondas experimental*

Parámetro	Condición de reacción
Masa de sustrato (nylon)	0.5000 g
Catalizador ácido	HCl
Concentración de solución ácida	6N
Volumen de solución ácida	40.00 mL
Potencia de reacción ^a	500 W 700 W
Tiempo de reacción ^a	30 min 60 min 90 min

Nota: (a) Parámetro variable. Depende del número de ensayo (Ver tabla 2.3)

2.4 Tratamiento de reacción para estimación de rendimiento

El proceso de tratamiento de reacción para estimar el rendimiento por conversión se llevó a cabo con el enfriamiento de las muestras hasta la temperatura ambiente. Luego se filtró con la finalidad de separar los productos sólidos y líquidos. El filtrado se realizó con papel filtro, el cual fue previamente pesado para que no interfiriera en el rendimiento del producto. El contenido sólido retenido en el papel fue llevado a secado a 50.00°C en una estufa de la marca Barnstead por 24 horas aproximadamente.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Masa final}}{\text{Masa inicial}} * 100\% \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 indica el rendimiento de la reacción, donde la masa final representa el contenido sólido restante seco; mientras que, la masa inicial indica la cantidad másica de muestra que se colocó inicialmente en el reactor.

2.5 Aislamiento de monómeros

El procedimiento experimental de aislamiento de monómeros de las mezclas de reacción para ambos sistemas es el mismo. En la Figura 2.2 se detalla el proceso de aislamiento

del monómero de diamina de la disolución monomérica obtenida, como un aporte adicional al desarrollo de la investigación.

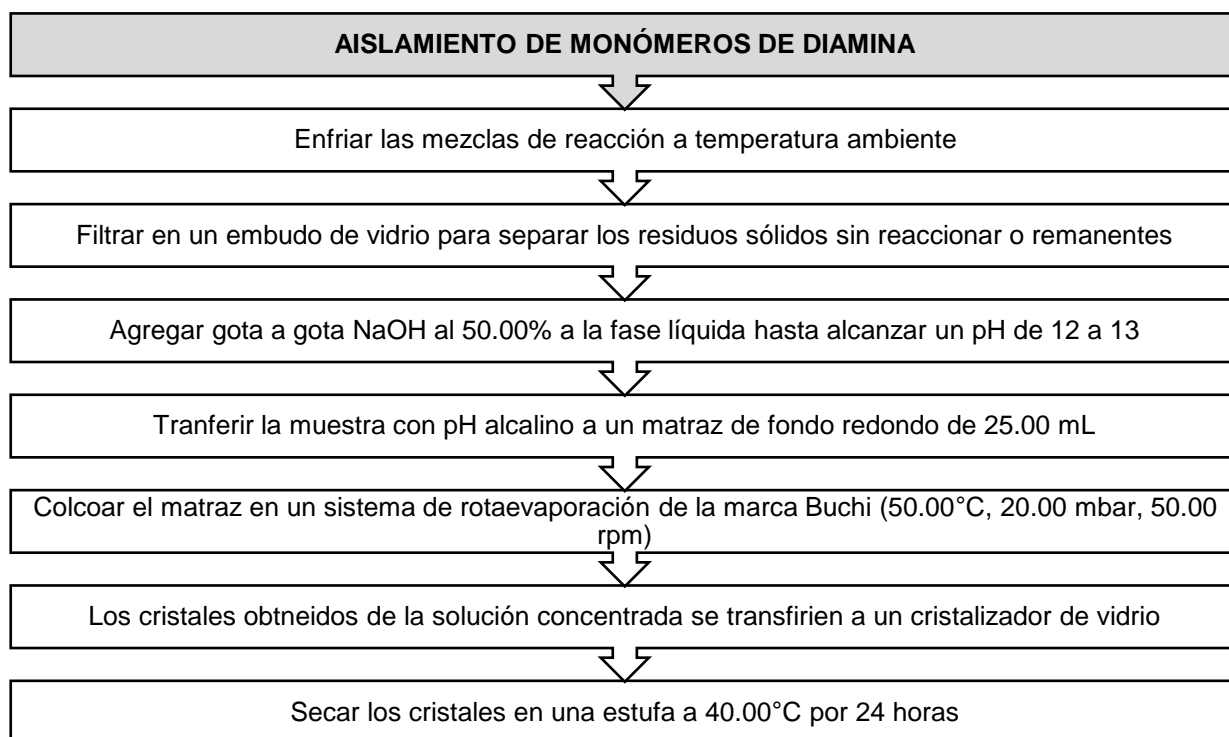


Figura 2.2 Procedimiento experimental de aislamiento y purificación de monómeros

2.6 Caracterización de monómeros

Los monómeros obtenidos en forma de cristales en la etapa de aislamiento se caracterizaron mediante punto de fusión y espectroscopía infrarroja.

2.6.1 Punto de fusión

El punto de fusión se midió usando el equipo Stuart SMP30 y la ayuda de un capilar. Los puntos de fusión y ebullición teóricos de la hexametildiamina se obtuvieron de una ficha técnica de la empresa Carl Roth International, con una pureza mayor igual al 99.50%.

Tabla 2.5 Rangos de puntos de fusión y ebullición teóricos de hexametildiamina (Carl Roth, 2022)

Temperaturas de interés	Rango teórico (°C)
Punto de fusión	39.00 – 42.00
Punto de ebullición	199.0 – 204.0

2.6.2 FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) fue realizada por el personal del Laboratorio de Análisis Químico Instrumental LAQUINS ESPOL en el equipo de la marca Thermo Scientific modelo nicoleet iS10 con celda de seleniuro de zinc empleando la técnica ATR. Se utilizó una muestra de aproximadamente 0.3000 g para el monómero obtenido.

2.7 Análisis tecno económico

El análisis tecno económico inició con la recolección de información para implementar el sistema de despolimerización en plantas recicladoras de llantas con la necesidad de aprovechar el nylon residual. El primer paso se basa en la estimación de la producción mensual y anual del sistema mediante un balance de masa y tomando como referencia los rendimientos obtenidos experimentalmente. Adicional, se requiere la demanda de los productos anualmente y el crecimiento esperado dentro del sector de la industria de llantas.

Los equipos para la implementación de la planta de reciclaje de nylon se determinaron de acuerdo con los precios del mercado internacional en el sitio online “Alibaba” y considerando el valor agregado de importación. Los activos de la empresa contemplan únicamente a los equipos industriales ya que al tratarse de empresas consolidadas no requieren gastos de infraestructura, materiales de oficina o utensilios varios. Dentro de esa sección se detallaron los activos diferidos donde se consideraron costos de adecuación de la planta y gastos de constitución. Estos van de la mano con la actualización de los permisos de funcionamiento de la empresa constituida. Además, fue fundamental detallar los activos con su respectiva depreciación anual según el porcentaje del área donde se localiza.

El siguiente paso, consistió en la identificación de los sueldos y salarios del personal de acuerdo con “Estructuras ocupacionales – sueldos y salarios mínimos sectoriales y tarifas salarios mínimos sectoriales 2022” del Ministerio de Trabajo del Ecuador; donde se detalla la actividad industrial en la categoría de Construcción, Elaboración y Fabricación de otros productos industriales. El personal debe cubrir las necesidades

operativas de un anexo a la planta establecida por lo que la mano de obra será mínima con respecto al diseño de plantas nuevas.

Los ingresos de la compañía están basados en la producción de la hexametildiamina como referencia y a su tendencia de crecimiento en los próximos años, de acuerdo con la industria Continental Tire, dado a que es la única empresa ecuatoriana dedicada a la fabricación de llantas. Además, se consideraron las toneladas esperadas de producción de los principales productos considerando el rendimiento de los experimentos y precios del mercado internacional.

El siguiente paso consistió en la recopilación de los datos variables del negocio, los cuales se basan principalmente en costos de las materias primas, materiales extras y sustancias empleadas para la reacción de despolimerización. Para verificar la tendencia positiva del negocio se realizó una proyección anual y mensual de los costos variables considerando la tendencia de crecimiento previamente establecida. Por otro lado, se detallaron los costos fijos del proyecto los cuales contemplan gastos específicos de personal administrativo y de publicidad. Estos costos se relacionan con la comunicación efectiva que debe existir con el sector industrial que utilizan los monómeros. Es fundamental considerar en esta sección los costos extras de producción como: limpieza, transporte, mantenimiento y seguridad.

En Ecuador, las empresas consolidadas en el reciclaje de llantas son de tamaño mediano por lo que la instalación de una nueva sección para el aprovechamiento químicos requiere una inversión externa como financiamiento bancario. Fue necesario establecer los tiempos de pago, los porcentajes de crédito y los impuestos para determinar los costos de inversión inicial y final del financiamiento para la extensión de la planta; así también como realizar la proyección del capital de trabajo destinado.

Finalmente, se realizó el flujo de caja donde se recopilaron todos los costos establecidos previamente y los ingresos estimados del proyecto. En esta sección, se fijaron variables como el impuesto a la renta, margen de contribución y las utilidades respectivas, con la finalidad de realizar la proyección del flujo neto del proyecto a lo largo del tiempo establecido. El resultado se evidencia con la determinación de variables económicas: VAR, TMAR y TIR, las cuales indican la viabilidad y factibilidad del proyecto.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del sustrato

3.1.1 Limpieza del residuo textil

La limpieza previa de la muestra permitió cuantificar la cantidad de caucho presente en la misma. Luego de la separación de una importante cantidad de este remanente por medio de vibración mecánica en la zaranda, se obtuvo que el 41.74% correspondía a caucho que no había sido separado en el proceso de reciclaje. Las partículas de mayor tamaño mezcladas con el residuo textil se extrajeron manualmente. Se determinó que la muestra puede contener alrededor de hasta un 62.38% de carga de caucho.

3.1.2 Análisis termogravimétrico

La Figura 3.1 presenta el resultado reportado por el personal de Laboratorio de Ensayos de Materiales LEMAT ESPOL para el análisis termogravimétrico del material entregado. La gráfica muestra dos corridas en el equipo y se registra un importante cambio de masa en función de la temperatura a 255.7°C, este valor representa el punto de fusión del material analizado. Por otro lado, también se reporta un valor de 96.90°C para la temperatura de transición vítrea, por encima de este valor el polímero cambia de un estado vítrea, perdiendo la rigidez. Los resultados fueron comparados con la literatura, los valores encontrados se ajustan al material PA66 – Polyamide 66 con punto de fusión dentro del rango de 225.0 °C a 265.0 °C y una temperatura de transición vítrea aproximadamente de 90.00°C. (Ehrenstein et al., 2008).

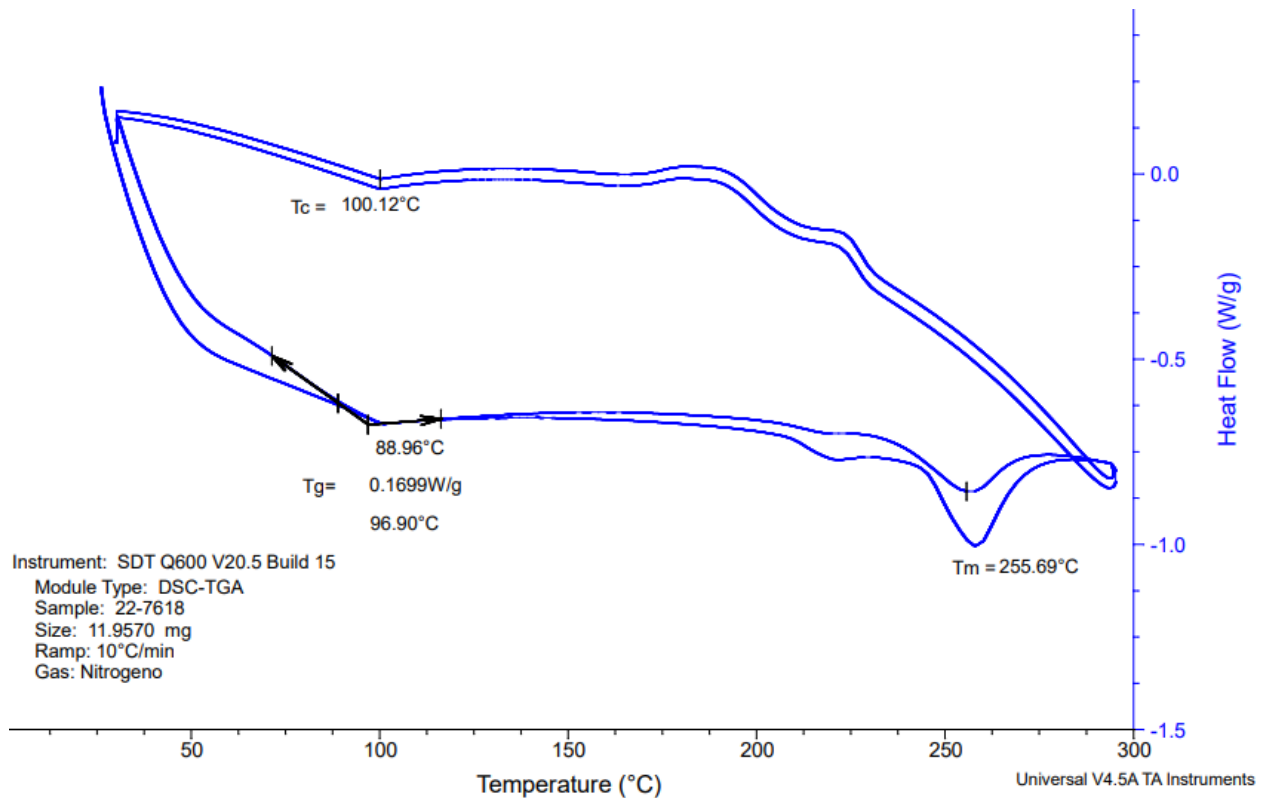


Figura 3.1 Resultado de TGA del residuo textil derivado del reciclaje de llantas

Fuente: Laboratorio de Ensayos de Materiales, LEMAT ESPOL (2022)

3.1.3 FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier se empleó para la determinación de las unidades estructurales básicas en la configuración química del nylon 6,6. El resultado del espectro (Figura 3.2) muestra interferencia en una importante zona de la región de grupos funcionales. Las bandas de absorción representativas se encuentran desplazadas u ocultas de bandas de otros grupos funcionales, esto se debe a la presencia de restos de caucho en la muestra. El estiramiento de tensión N-H característico del grupo amida entre 3500 cm^{-1} y 3300 cm^{-1} se puede visualizar, pero con una banda menos alargada debido a esta interferencia en 3302 cm^{-1} . Se observa una vibración de estiramiento de tensión C-H debido al grupo alcano con un pico medio en 2918 cm^{-1} . Las vibraciones de flexión en el rango de 1700 cm^{-1} y 1500 cm^{-1} se atribuyen a la presencia de grupos amida I y II. El pico de tensión cerca de 1710 cm^{-1} corresponde al enlace C=O del grupo carbonilo que se une con el grupo amino. En la región de la huella dactilar se observa el estiramiento C-N en el rango de 1360 cm^{-1} a 1200 cm^{-1} (Salmiati et al., 2020).

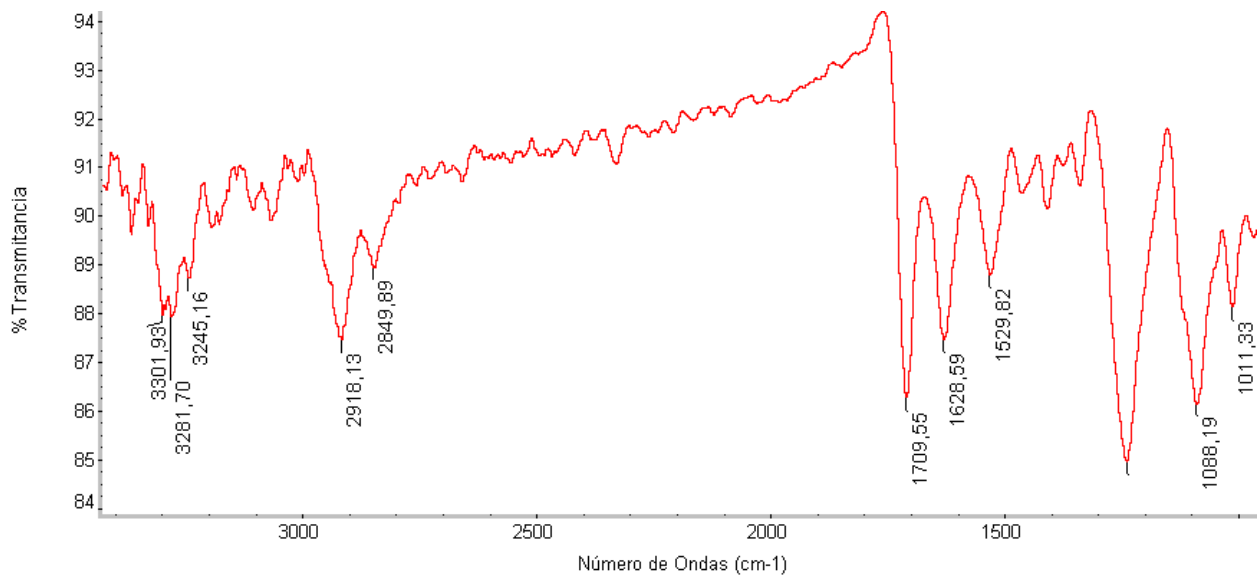


Figura 3.2 Resultado de FTIR del residuo textil derivado del reciclaje de llantas

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico Instrumental, LAQUINS ESPOL (2022)

3.2 Sistema de hidrólisis electrotérmica

Se reportan resultados experimentales basados en los rendimientos por conversión obtenidos de la reacción de despolimerización para el sistema de hidrólisis electrotérmica utilizando los parámetros descritos en la Tabla 2.2.

Los rendimientos obtenidos para el primer conjunto de reacciones demostraron que el nylon puro, se despolimeriza en promedio 93.41%. Sin embargo, hay que considerar que el sólido contenido en el papel filtro luego de la separación de las mezclas de reacción, corresponde en un porcentaje considerable al colorante negro que se les agrega a los pellets. Por ende, el rendimiento de reacción para nylon 6 en el sistema propuesto se puede aproximar al 100.0%.

Por otro lado, para el material polimérico reciclado los rendimientos de reacción cuando la hidrólisis ocurre en un medio ácido con HCl 6N, es de 45.14% en promedio. Los resultados experimentales mostraron un aumento del rendimiento cuando se agregó 50.00% de masa de zeolita con respecto a la cantidad de sustrato. Se promedió el resultado de las dos repeticiones de este ensayo y se reporta un 56.85% de despolimerización a las mismas condiciones que los otros experimentos mencionados. Por consiguiente, se demostró que el uso de zeolita mordenita acelera la hidrólisis de las

amidas solubles por su alto contenido de sílice que permite que actúe como un ácido de Lewis.

Se observó que el sólido sin reaccionar corresponde en mayor proporción a remanentes del proceso de reciclaje, principalmente caucho. En menor cantidad se puede distinguir que existe presencia de material textil que se desintegra en el proceso de despolimerización, pero no termina de reaccionar. Hay que considerar que el sustrato no se limpia previamente, sino que se toma tal como sale del proceso de reciclaje. Como se detalla en la sección 3.1 la muestra puede contener hasta 62.38% de carga de caucho al ser heterogénea. Lo que indica, que el material textil se despolimeriza aproximadamente en su totalidad y que el residuo sólido que se obtiene en la filtración corresponde en su mayoría a caucho (Figura 3.3), el cual no se ve afectado a las condiciones de reacción planteadas.

Tabla 3.1 *Resultados de rendimiento por conversión sistema electrotérmico*

Ensayo	Mezcla de reacción	Primera repetición	Segunda repetición
1	Nylon 6 puro + solución de HCl	91.31%	95.50%
2	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	47.22%	43.05%
3	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl + zeolita	56.46%	57.24%

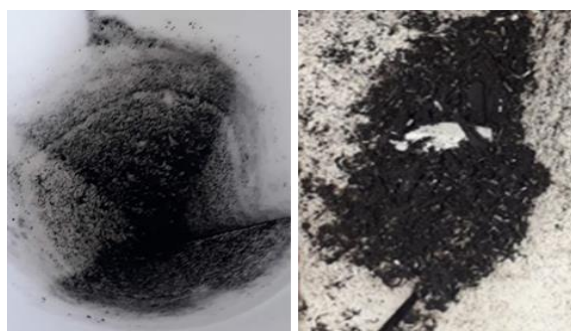


Figura 3.3 Evidencia de residuos de reacción sólidos filtrados. Nylon 6 vs. Nylon 6,6.

3.3 Sistema de hidrólisis asistida por microondas

Se obtuvieron los resultados de rendimiento por conversión reportados en la Tabla 3.2 para las reacciones en el sistema de hidrólisis ácida asistida por microondas, considerando los parámetros mostrados en la Tabla 2.4. Los ensayos se realizaron por duplicado y se demostró que son reproducibles a las condiciones propuestas.

En el primer grupo de ensayos experimentales (1 al 6) se llevó a cabo la despolimerización por hidrólisis ácida de nylon 6 puro en forma de pellets, proporcionados por LEMAT ESPOL. Los resultados reflejan que el nylon se despolimeriza por encima del 95.00% para todos los casos. El mayor rendimiento se obtuvo cuando la potencia y tiempo se ajustaron a los valores máximos propuestos, 700 W y 90 minutos respectivamente.

Por otra parte, para el segundo grupo de ensayos de despolimerización (7 al 12) se utilizó el material textil proporcionado por la empresa recicladora de llantas. En base a la cuantificación previa este contiene hasta un 62.38% de caucho en diferentes granulometrías. Los rendimientos de reacción muestran que se transforma entre el 22.02% y 25.91% del material sólido que ingresa al sistema. Si se considera la carga de caucho presente, se estima que se despolimeriza aproximadamente el 50.00% del total correspondiente a nylon 6,6. Los valores de rendimiento obtenidos no difieren significativamente entre un ensayo y otro.

Tabla 3.2 *Resultados de rendimiento por conversión sistema microondas*

Ensayo	Mezcla de reacción	Potencia Tiempo	Primera repetición	Segunda repetición
1	Nylon 6 puro + solución de HCl	500 W 30min	95.55%	94.24%
2	Nylon 6 puro + solución de HCl	500 W 60min	96.89%	94.71%
3	Nylon 6 puro + solución de HCl	500 W 90min	97.02%	96.27%
4	Nylon 6 puro + solución de HCl	700 W 30min	97.07%	96.61%
5	Nylon 6 puro + solución de HCl	700 W 60min	97.17%	96.83%
6	Nylon 6 puro + solución de HCl	700 W 90min	98.82%	97.29%
7	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	500 W 30min	23.19%	20.85%
8	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	500 W 60min	24.36%	22.07%
9	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	500 W 90min	25.95%	24.57%
10	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	700 W 30min	23.42%	21.29%
11	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	700 W 60min	25.02%	24.70%
12	Nylon 6,6 reciclado + solución de HCl	700 W 90min	25.99%	25.83%

3.4 Aislamiento de monómeros

Se logró mediante el desarrollo experimental el aislamiento de cristales de color amarillento, a través del paso a pH alcalino de la disolución monomérica en estado ácido resultante del proceso de despolimerización. El sólido obtenido era similar en apariencia a la hexametildiamina comercial.



Figura 3.4 Cristales aislados de la disolución monomérica

3.5 Caracterización de monómeros

3.5.1 Punto de fusión

Se observó que el sólido colocado dentro del capilar en el equipo Stuart SMP30 presentó ligeros cambios de masa a aproximadamente 49.30°C, sin embargo, no se logró determinar un rango de temperatura de fusión. La temperatura del equipo se incrementó manualmente hasta 300.0°C para verificar si existían cambios relevantes hasta dicho valor. Esto permitió observar que a 197.4°C la muestra empezó a mostrar signos de ebullición, valor que se aproxima al rango teórico establecido para la hexametildiamina. Por este método no se logró comprobar que la sustancia aislada correspondía a una amina en estado puro.

3.5.2 FTIR

El espectro infrarrojo (Figura 3.5) presenta una banda de flexión en la zona de grupos funcionales en 1559 cm^{-1} correspondiente al grupo N-H. En el rango de 3500 cm^{-1} a 3300 cm^{-1} se debería observar la existencia de dos bandas de estiramiento pertenecientes al grupo N-H al tratarse de una amina primaria. Sin embargo, esta no es visible por la presencia del grupo OH atribuida al exceso de NaOH de la neutralización o humedad. La banda de estiramiento débil en 1413 cm^{-1} se asigna al grupo C-N.

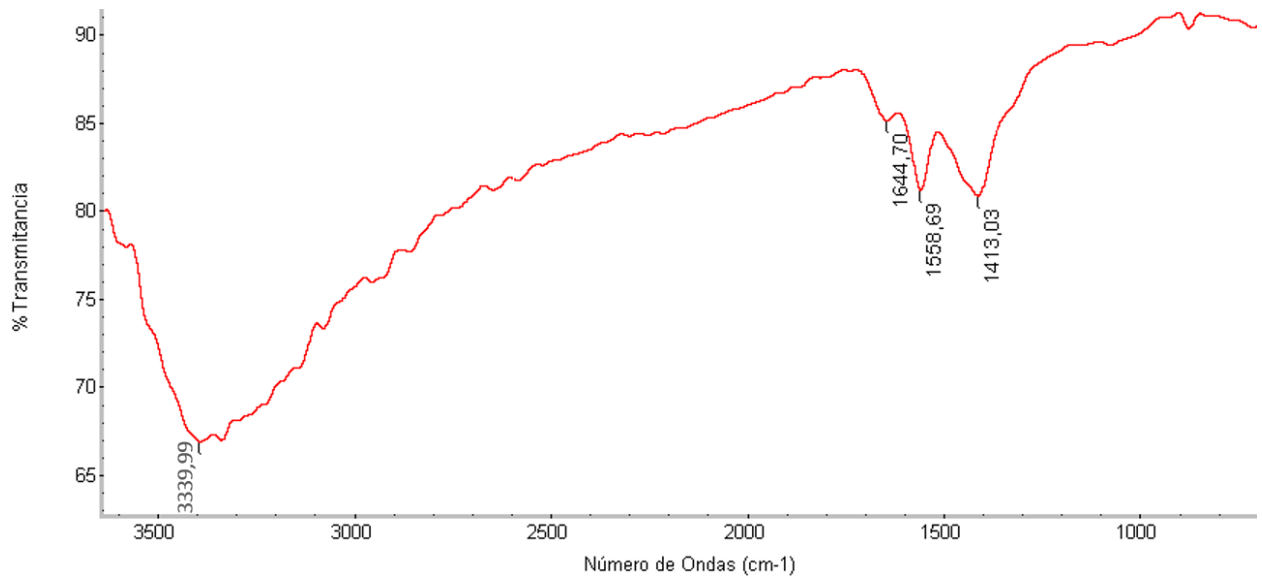


Figura 3.5 Resultado de FTIR de los cristales aislados

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico Instrumental, LAQUINS ESPOL (2022)

3.6 Diseño del proceso

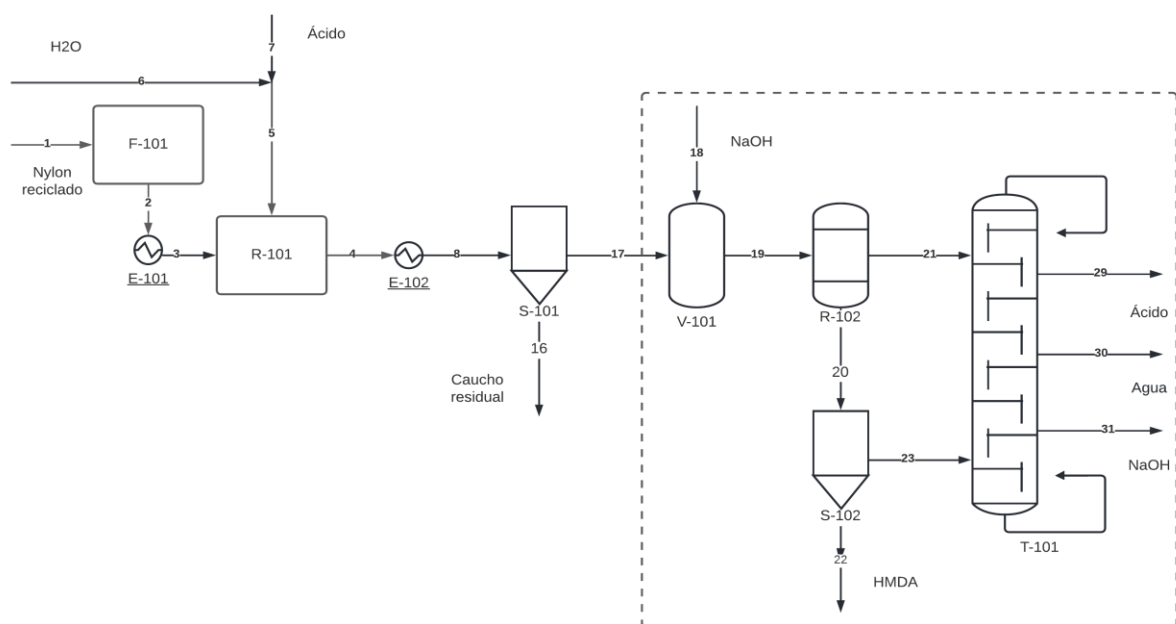


Figura 3.6 Diagrama de proceso de planta de reciclaje de nylon

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para la implementación de un sistema de polimerización a escala industrial se realizó el diagrama del proceso (Figura 3.6). El proceso considera inicialmente el tamizado de la muestra de nylon reciclado para eliminar el caucho residual, para luego ser precalentado

para entrar en el reactor (Microondas o electrotérmico) junto con el ácido por un tiempo establecido para luego enfriar la mezcla de reacción. El equipo denominado Split tendrá la función de separación para obtener dividir los productos sólidos del caucho residual y líquidos. La mezcla líquida se alcaliniza en un contenedor y se evapora mediante una destilación flash. Los sólidos retenidos son recolectados y llevados a un separador de sólidos final y el líquido evaporado se hace pasar por una columna de destilación fraccionada para recolectar la mayor cantidad de materias primas. El proceso en mención es válido para la despolimerización por medio del sistema electrotérmico y asistido por microondas.

3.7 Análisis tecno-económico

El análisis económico se estableció a partir del diseño experimental, tomando como referencia los equipos a nivel industrial. La Figura 3.6 muestra el diagrama de proceso para despolimerizar el nylon residual tal como se receipta al final del proceso de reciclaje de llantas. El proceso consta de 2 secciones, la primera está basada en despolimerización del residuo y una separación de las fases resultantes, la siguiente etapa consiste en el tratamiento químico del producto de reacción para obtener hexametildiamina.

3.7.1 Mercado

La Tabla 3.3 recopila la información de la demanda del país y su nivel de crecimiento junto con datos de producción determinados a partir del balance general del proceso obtenido experimentalmente. Tomando como referencia una capacidad de producción aproximada al rendimiento de los resultados de laboratorio.

Tabla 3.3 Demanda y producción del sistema de despolimerización de Nylon reciclado

Producción total Final		
Capacidad de Producción	50.00%	50.00%
Producción Mensual	375.0	3000
Producción Anual	4500	36000
Hexametildiamina	4500	36000

3.7.2 Costos de equipos

En la Tabla 3.4 se detalla la información utilizada para ambos sistemas considerando el valor adicional del impuesto a la renta requerido por los agentes regulatorios. Para el sistema por microondas el costo total de equipos es de \$ 32 352.00. Mientras que, el sistema de despolimerización de nylon reciclado por el método electrotérmico tiene un costo de equipos de \$ 29 776.00. La diferencia entre los costos de los sistemas se debe principalmente al costo del reactor microondas. Esto se debe a su funcionamiento por medio de ondas electromagnéticas requiere materiales más resistentes y el control de parámetros para el aseguramiento de la reacción y de los sistemas de seguridad.

Tabla 3.4 Costo de equipos sistema microondas y electrotérmico

Equipo	Detalle	Precio final
Reactor (1) ^a	Henan Xinhang Company-horno microondas industrial de alta eficiencia	\$ 5 600.00
Reactor (1) ^b	Autoclave industrial de alta eficiencia	\$ 3 024.00
Tamiz (1)	Tamiz industrial de cubierta fina, separador de pantalla vibratoria lineal de arena de doble capa	\$ 1 680.00
Destilador flash (1)	Evaporador de tubo MVR multiefecto industrial de fábrica	\$ 6 272.00
Horno (1)	Horno de secado con tratamiento térmico de 300°	\$ 2 240.00
Split (2)	Industrial separador ciclón colector de polvo de carbón	\$ 4 240.00
Tanques (1)	Tanque de almacenamiento de acero inoxidable,	\$ 1 120.00
Destilador fraccionado (1)	Fraccionario corto camino de destilación Molecular	\$ 11 200.00
TOTAL SISTEMA MICROONDAS		\$ 32 352.00
TOTAL SISTEMA ELECTROTÉRMICO		\$ 29 776.00

Nota: (a) Reactor sistema microondas. (b) Reactor sistema electrotérmico.

Los equipos del sistema propuesto requieren costos adicionales para la implementación de la planta, por tal motivo, se tomaron como referencia los factores de corrección de materiales y de temperatura. El monto total de la implementación de la planta para el sistema de despolimerización corresponde a \$ 299 967.74 para el sistema asistido por microondas y \$ 276 083.07 para el sistema electrotérmico. Se utilizó un factor de 9.272 para ambos casos. Los equipos destinados a la implementación de la planta, a su vez se consideran activos fijos de la empresa, a los cuales se determina un valor de depreciación del 10.00% y el valor del salvamento, con fines de la determinación del flujo de caja del proyecto.

3.7.3 Costos variables y fijos

Los costos variables del proyecto contemplan los gastos operativos de la implementación de la planta. El valor del pago anual correspondiente al talento humano requerido para las actividades es de \$ 51 098.47, considerando 1 supervisor de área, 1 analista de calidad y 3 operadores. Además, dentro de los costos variables se estiman los precios de materiales a utilizar, principalmente de las materias primas requeridas en el proceso. Cabe destacar, que el valor del nylon reciclado es insignificante debido a que se tiene la disponibilidad de este recurso en la planta existente.

Tabla 3.5 Costo anual de materias primas

Materias primas	Cantidad	Unidad	Costo	Anual
Nylon reciclado	1	kg	\$ 0.00	\$ 0.00
Ácido clorhídrico	15	kg	\$ 0.08	\$ 428.40
Hidróxido de sodio	1	kg	\$ 1.68	\$ 604.80
Refrigerante	0,03	Ton	\$ 13.70	\$ 147.96
TOTAL				\$ 1 181.16

Los costos fijos destinados en esta sección únicamente consideran precios de los servicios básicos como agua y electricidad, así como gastos de administrativos y publicitarios necesarios para la venta e importación del producto final. Dado a que la planta del cliente no mantiene un sistema de generación de energía autónomo, la empresa compra la energía necesaria a la empresa eléctrica del sector generando altos costos y un aumento en la variable fija anual, con la incorporación del nuevo sistema.

3.7.4 Flujo de caja

El análisis tecno-económico realizado se basa en los resultados estimados de los dos sistemas de despolimerización del Nylon reciclado. El proceso asistido por microondas se caracteriza por una mayor producción, en la cual se procesan aproximadamente 200.0 kg del residuo con una capacidad productiva del 50.00% y considerando un tiempo de reacción de 60 min por batch. Por otro lado, el proceso mediante el método electrotérmico tiene una capacidad productiva del 50.00% con 25.00 kg diarios de nylon reciclado como alimentación. Para este sistema, se considera un tiempo de reacción de 24 horas, fijado experimentalmente en un batch. La rentabilidad del proyecto mediante ambos métodos se puede observar en la Tabla 3.6 con los resultados del TIR y VAN de

cada proceso, con una factibilidad económica mayor para el sistema de microondas. Los resultados del proyecto se basaron a su vez en el costo del producto final, la hexametildiamina, que presenta un valor global de \$5/kg con una pureza del 70.00% aproximadamente.

Tabla 3.6 Comparación de variables económicas de ambos sistemas

Sistema	TMAR	TIR	VAN
Microondas	16.48 %	39.00 %	\$ 208 860.07
Electrotérmico	16.48 %	7.000%	\$ 84 124.92

El capital de trabajo del presente proyecto para el sistema más rentable se planteó a partir de inversionistas y préstamos al banco, con tiempo de pago de 7 años. Esta tendencia se evidencia en la Figura 3.7, con un flujo positivo por la inversión inicial de accionistas y el retorno total del capital de trabajo.

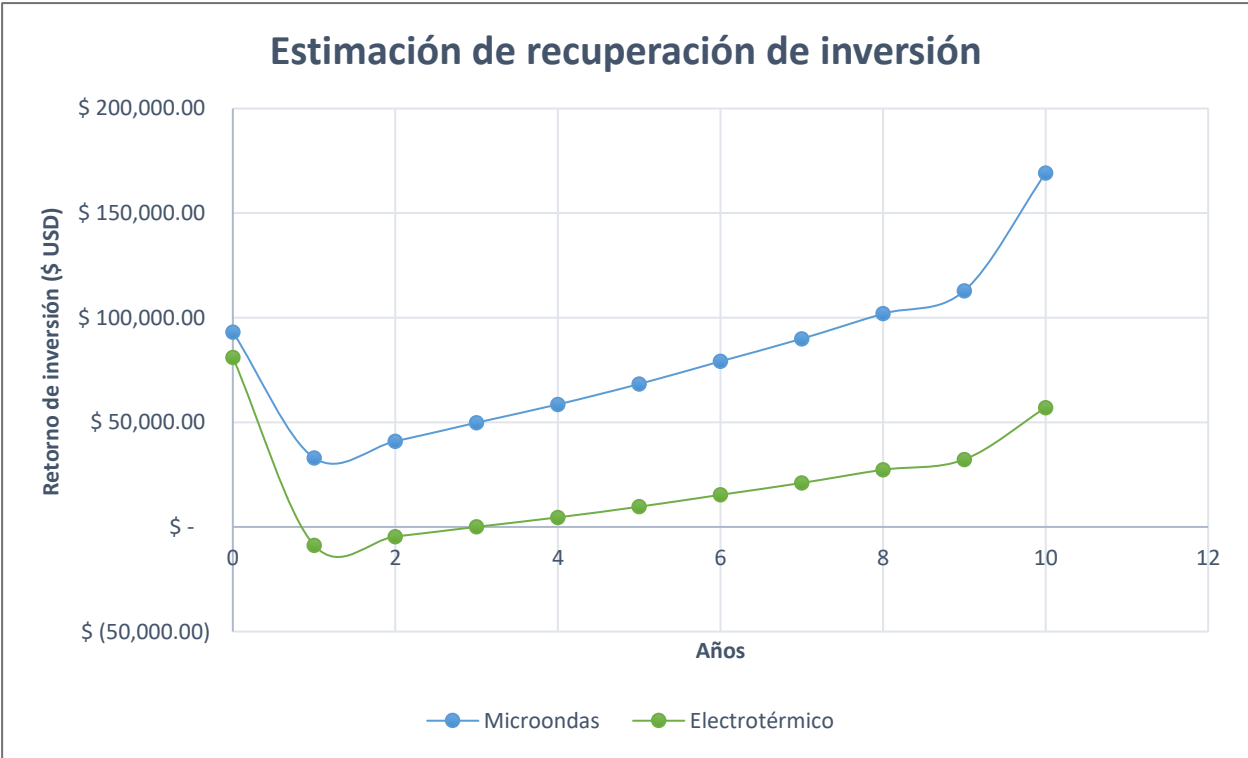


Figura 3.7 Curva de estimación de recuperación de inversión

Fuente: Elaboración propia (2022)

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Con la finalidad de desarrollar un sistema de despolimerización del nylon residual producto de proceso de reciclaje de llantas por hidrólisis ácida, se realizó la determinación de las condiciones de reacción en base al diseño experimental para la obtención de monómeros por dos sistemas: microondas y electrotérmico. Los rendimientos por conversión de ambos fueron comparados y se realizó un análisis técnico – económico considerando el proceso a escala industrial. El desarrollo de este trabajo permitió concluir que:

- Se determinaron condiciones de operación en donde los resultados de rendimiento entre una repetición y otra fue menor al 5.000%, lo que demostró que los experimentos son replicables. En el sistema de hidrólisis en medio electrotérmico se obtuvo un rendimiento promedio de 93.41% cuando se trabajó con nylon puro. De igual forma, para el sistema asistido por microondas se reportó un resultado de transformación del 96.54%. Los valores obtenidos demostraron que las condiciones de reacción fijadas permiten llevar a cabo la despolimerización de esta poliamida. Los parámetros para el sistema electrotérmico fueron tiempo (24 horas), temperatura (160.0°C) y concentración de la solución ácida (HCl 6N). Además, se realizó un ensayo con zeolita ácida que demostró que el uso de este mineral aumenta un 11.00% el rendimiento. Para el sistema asistido por microondas, se fijó la concentración de ácido (HCl 6N) y se evaluaron los resultados en base a la variación de potencia de 500 W y 700 W, junto con tiempos de reacción entre 30, 60 y 90 minutos. Se consideró como condición óptima un tiempo promedio (60 min) a la menor potencia (500 W). Esto se debe a que los rendimientos en el sistema microondas no mostraron diferencias significativas entre un ensayo y otro. El sistema de despolimerización desarrollado permitió la obtención de una solución monomérica, de la cual se logró aislar el monómero de diamina
- Se compararon los resultados experimentales obtenidos, donde el sistema electrotérmico presenta un mayor rendimiento de transformación del nylon

residual. Se despolimerizó 45.14% en promedio cuando se empleó solo HCl 6N y aumentó a 56.85% cuando se agregó zeolita mordenita. Mientras que, para las reacciones asistidas por microondas, los resultados obtenidos se reducen aproximadamente a la mitad al ser comparados con el otro sistema, 23.94% en promedio. Los sistemas difieren principalmente en el uso de reactores. Se empleó un reactor cerrado de tipo autoclave en el convencional; mientras que, en el asistido por microondas se utilizó un equipo casero con un reflujo adaptado a condiciones de vaso abierto. El sistema microondas no permitió controlar la temperatura, mientras que el tiempo fue significativamente menor con respecto al empleado para la hidrólisis en un sistema electrotérmico. El diseño experimental propuesto para ambos casos no permitió la toma de alícuotas, esto limitó la optimización de tiempos sobre todo cuando se trabajó en reactor autoclave.

- Se determinó la rentabilidad del proyecto para incluir el aprovechamiento químico del residuo textil en plantas de reciclaje de llantas mediante un sistema de despolimerización por hidrólisis ácida considerando principalmente el sistema de reacción por microondas. Los resultados se proyectaron en 10 años obteniendo una tasa de retorno de la inversión del 39%. El capital de trabajo de \$180 246.23, fue gestionado por accionistas mayoritarios de la compañía y un préstamo al banco, considerando un 9.150% de Interés fijado por la compañía en un lapso de 7 años. De igual forma, el valor actual neto recaudado al final de 10 años es de \$208 860.07, monto que indica una factibilidad económica del aprovechamiento de un residuo. La eficiencia de este sistema se debe principalmente a los tiempos de reacción dentro del microondas de aproximadamente 60 min, los cuales contribuyen a un aumento de producción de hexametildiamina, pese a tener una capacidad productiva del 50.00%. El sistema electrotérmico, por su parte, mantiene menores costos de inversión determinados en la Tabla 3.6 y energéticos, pero requiere tiempos de reacción de aproximadamente 24 horas, lo cual disminuye la producción anual de hexametildiamina; cabe destacar que este último tiempo de reacción necesitan ajustes experimentales.

4.2 Recomendaciones

- Es recomendable el ajuste de los tiempos de reacción utilizando el método electrotérmico para reducir los tiempos de reacción. Esto se puede lograr

mediante un diseño experimental donde se fijen parámetros como concentración y temperatura, y se varíe el tiempo. Además, se debe considerar que los tiempos de reacción deben ser mayores a 2 horas, como lo indican los datos bibliográficos.

- Se recomienda el uso de ácido fosfórico como agente catalizador en el sistema de reacción por microondas ya que este ácido, teóricamente presenta un mayor rendimiento al activarse por medio de las ondas electromagnéticas emitidas por el microondas. El uso de esta sustancia facilitaría la accesibilidad a la implementación del sistema, ya que se trata de una sustancia no controlada y con menor costo, en contraste con el ácido implementado en este trabajo.
- Para el diseño industrial se sugiere emplear una centrifuga de sólidos, debido a que estos equipos permiten la separación eficiente de material sólido por diferencia de densidades. De este modo, la incorporación de esta máquina permitirá el aislamiento inicial de las partículas de caucho u otros residuos dentro del material textil, elevará los rendimientos de reacción y proporcionará mayor facilidad hacia la obtención del ácido adípico.
- Para la obtención de los monómeros de diácido se sugiere realizar una extracción ácida – base, llevando el pH de la solución monomérica a 7 agregando gota a gota hidróxido de amonio. Para la separación de la fase orgánica se propone el uso de éter de petróleo. Una vez separadas, agregar a la fase orgánica hidróxido de amonio para precipitar los monómeros de diamina y concentrarlos en el rotaevaporador. Por otro lado, a la fase acuosa se acidifica hasta precipitación. Hay que considerar que el ácido adípico tiene un pH teórico de 2.7 a temperatura ambiente.

GLOSARIO

Poliamida 66: es un polímero compuesto por un diácido (ácido adípico) y una diamina (Hexametilendiamina). También denominado nylon 6,6 (Češarek et al., 2020).

Hidrólisis electrotérmica: proceso de rupturas de moléculas de agua mediante calentamiento continuo a partir de la transferencia de energía por convección proveniente de fuentes eléctricas (Chen et al., 2010).

Hidrólisis asistida por microondas: consiste en la reacción de hidrólisis a través del calentamiento continuo producido por emisiones de ondas electromagnéticas mediante la transferencia de calor por radiación (Klun & Kržan, 2000).

Extracción Líquido – Líquido: técnica de separación de dos componentes líquidos miscibles mediante un disolvente, el cual garantiza la separación por diferencias de solubilidades dado a que tiene afinidad únicamente con un componente y es insoluble en el restante, logrando crear dos fases inmiscibles de fácil separación (Smith et al., 2007).

BIBLIOGRAFÍA

- Apaza, J. (2017). Diseño e implementación del sistema de control eléctrico y separación electromagnética en el proceso del reciclado de llantas, I.I.A.T. In *Repositorio Universidad Mayor de San Andrés*.
<https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/9903>
- Carl Roth. (2022). Ficha de datos de seguridad. Hexametilendiamina. *Carl Roth*, 1(1907), 1–18. https://www.carlroth.com/downloads/sdb/es/0/SDB_0183_ES_ES.pdf
- Castillo, P., Zenteno, E., Gonzales, L., Sotomayor, M., & San Román, E. (2014). Aplicaciones y Teoría de Ingeniería de Microondas. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis, March*, 115.
https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A009/type/book_part
- Cerioti, A., Pinto, M., Poliszuk, A., & Ybarra, G. (2014). Espectroscopia infrarroja. Identificación de muestras envejecidas naturalmente mediante el uso de materiales de referencia envejecidos artificialmente. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 3, 290–296.
- Češarek, U., Pahovnik, D., & Žagar, E. (2020). Chemical recycling of aliphatic polyamides by microwave-assisted hydrolysis for efficient monomer recovery. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(43), 16274–16282.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05706>
- Chanda, M. (2021). Chemical aspects of polymer recycling. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(2), 133–150.
<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.005>
- Charles, J., Ramkumaar, G. R., Azhagiri, S., & Gunasekaran, S. (2009). FTIR and thermal studies on nylon-66 and 30% glass fibre reinforced nylon-66. *E-Journal of Chemistry*, 6(1), 23–33. <https://doi.org/10.1155/2009/909017>
- Chen, J., Li, Z., Jin, L., Ni, P., Liu, G., He, H., Zhang, J., Dong, J., & Ruan, R. (2010). Catalytic hydrothermal depolymerization of nylon 6. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 12(4), 321–325. <https://doi.org/10.1007/s10163-010-0304-y>
- Ehrenstein, G., Riedel, G., & Trawiel, P. (2008). Thermal analysis of plastics. In *Journal of Chemical Education* (Vol. 85, Issue 3). <https://doi.org/10.1021/ed085p404>
- El Comercio. (2012). Historia de la llanta. *El Comercio*, 1.
<https://www.elcomercio.com/deportes/carburando/historia-llanta.html>

- González, A. (2009). *Hidrólisis*. 1–11.
- Grupo FARO. (2019). ODS Territorio Ecuador: “Logros y desafíos en la implementación de los ODS en Ecuador”. *Panorama Sostenible Anual No. 1.*, 123.
- Klun, U., & Kržan, A. (2000). Rapid microwave induced depolymerization of polyamide-6. *Polymer*, 41(11), 4361–4365. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00658-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00658-8)
- Kumar, A., Wolff, N. Von, Rauch, M., Zou, Y., Shmul, G., Ben-david, Y., Leitus, G., Avram, L., Milstein, D., Kumar, A., Wolff, N. Von, Rauch, M., Zou, Y., Shmul, G., Kumar, A., Wolff, N. Von, Rauch, M., Zou, Y., Shmul, G., & Ben-da-, Y. (2020). Hydrogenative Depolymerization of Nylons. *Journal of the American Chemical Society*, 142(33), 14267–14275.
- Marconi, M., Landi, D., Meo, I., & Germani, M. (2018). Reuse of Tires Textile Fibers in Plastic Compounds: Is this Scenario Environmentally Sustainable? *Procedia CIRP*, 69(May), 944–949. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.074>
- Patil, D. B., & Madhamshettiwar, S. V. (2014). Recovery of monomer from nylon waste powder for its recycling. *Oriental Journal of Chemistry*, 30(1), 1–8. <https://doi.org/10.13005/ojc/300113>
- Pérez, R., & Saiz, L. (2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en recurso. *Revista de Plásticos Modernos*, 115(730), 11–18.
- Pizarro, F. (2013). *Valorización de caucho procedente de neumáticos fuera de uso*. 90. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144148/Valorización-de-caucho-proveniente-de-neumáticos-fuera-de-uso.pdf?sequence=1>
- Prado, J., & Morán, E. (2011). Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos Investigación Química Introducción. *An Quim*, 107(2), 129–136. www.rseq.org
- Ramírez, S. N., Sáenz, A., López, L., & Cantú, L. (2013). *Amidas , Aplicación y Síntesis*. 9, 38–46.
- Rodríguez, A. (2019). *Plan De Negocio De Ecoriental De Llantas, Dedicada a La Fabricación De Productos a Partir Del Reciclaje De Llantas En La Región De La Orinoquia*.
- Salmiati, S., Khori, N., Khoriha, E. M., Hadibarata, T., & Yusop, Z. (2020). A combination of waste biomass activated carbon and nylon nanofiber for removal of triclosan from aqueous solutions. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 8(3), 1036–1045. [https://doi.org/10.47277/jett-8\(3\)1](https://doi.org/10.47277/jett-8(3)1)
- Shukla, S. R., Harad, A. M., & Mahato, D. (2006). Depolymerization of nylon 6 waste fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(1), 186–190.

<https://doi.org/10.1002/app.22775>

Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2007). Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. In *Termodinamica*. <http://librosysolucionarios.net/>

APÉNDICE

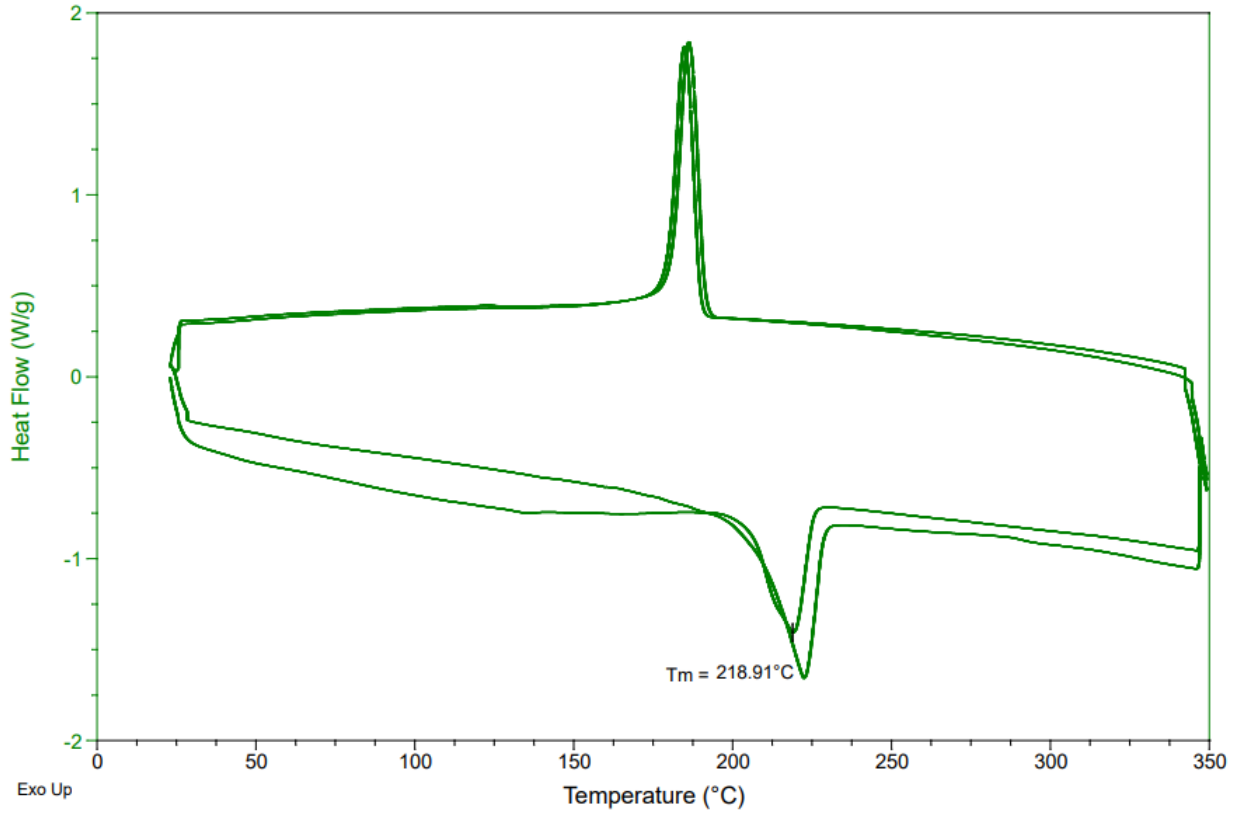
APÉNDICE A

Apéndice A.1 Resultado de DSC de pellet de nylon puro proporcionado por Laboratorio de Ensayos de Materiales LEMAT

Sample: 22-7309
Size: 5.3000 mg

DSC

File: E:\DSC\22-7309.001
Operator: ML
Run Date: 02-Mar-2022 09:26
Instrument: DSC Q200 V24.11 Build 124



Fuente: Laboratorio de Ensayos de Materiales, LEMAT ESPOL (2022)

Apéndice A.2 Datos teóricos de nylon puro – Poliamida 6 (Ehrenstein et al., 2008)

PA 6 – Polyamide 6	
<p>Type: semicrystalline (30–40%)</p> <p>Charakteristics: abrasion resistance, toughness, multifunctional, absorption of water up to 9.5%, often reinforced</p> <p>Identified by: milky white-yellow color, smell of burnt horn when burned, yellow flame with a blue halo, can be formed into a filament</p>	<p>Price (2002): ≈ 2.50 €/kg</p>
<p>Properties:</p> <p>$\rho = 1.12\text{--}1.15 \text{ g/cm}^3$</p> <p>$E = 2800/1000/600 \text{ MPa}$</p> <p>$\sigma_s = 80/45/\text{--} \text{ MPa}$</p> <p>$\epsilon_s = 4/25/\text{--} \%$</p> <p>$\epsilon_B = 30/> 50/\text{--} \%$</p> <p>$T_g = \sim 78/28/\text{--} 8 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{pm} = 225\text{--}235 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>Thermal limits:</p> <p>Short-time: ~ 140–160 °C</p> <p>Long-time: ~ 80–100 °C</p>	<p>Structure:</p> $\left[\text{NH} - (\text{CH}_2)_5 - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} \right]_n$ <p>Often blended with:</p> <p>PA 66, PA 12, PA 11, PE, ABS, ABR, PPS, PPE, PTFE, EPDM</p>
<p>$\sigma - \epsilon$ - Diagram:</p>	<p>E-Modulus f (Temp):</p>
<p>DSC - Diagram:</p>	<p>Coeff. of linear therm. expansion f (Temp):</p>

Fuente: (Ehrenstein et al., 2008)

APÉNDICE B

Apéndice B.1 Depreciación anual de equipos – Sistema electrotérmico

Equipo	Depreciación Anual	Valor	Total	Valor de Salvamento
Reactor	10.00%	\$ 1 700.00	\$ 170.00	\$ 850.00
Tamiz	10.00%	\$ 1 500.00	\$ 150.00	\$ 750.00
Destilador flash	10.00%	\$ 5 600.00	\$ 560.00	\$ 2 800.00
Horno	10.00%	\$ 2 000.00	\$ 200.00	\$ 1 000.00
Split	10.00%	\$ 2 000.00	\$ 200.00	\$ 1 000.00
Tanques	10.00%	\$ 1 000.00	\$ 100.00	\$ 500.00
Destilador fraccionado	10.00%	\$ 10 000.00	\$ 1000.00	\$ 5 000.00
Total			\$ 2380.00	\$ 11 900.00

Apéndice B.2 Tabla de amortización – Sistema electrotérmico

Tasa de Interés		9.15%	Años		7
Moneda		Dólares	Capital		\$ 178 399.49
AÑOS	CAPITAL	INTERESES	PAGO	SALDO	
0				\$ 178 399.49	
1	\$ 19 301.33	\$ 16 323.55	\$ 35 624.89	\$ 159 098.15	
2	\$ 21 067.40	\$ 14 557.48	\$ 35 624.89	\$ 138 030.75	
3	\$ 22 995.07	\$ 12 629.81	\$ 35 624.89	\$ 115 035.68	
4	\$ 25 099.12	\$ 10 525.76	\$ 35 624.89	\$ 89 936.55	
5	\$ 27 395.69	\$ 8 229.19	\$ 35 624.89	\$ 62 540.86	
6	\$ 29 902.40	\$ 5 722.49	\$ 35 624.89	\$ 32 638.47	
7	\$ 32 638.47	\$ 2 986.42	\$ 35 624.89	\$ -	

Apéndice B.3 Salario de personal – Sistema electrotérmico

Descripción	Valor
Supervisor de área	
Sueldo Mensual	\$ 449.58
Aporte Patronal	\$ 50.13
Decimo Tercer Sueldo	\$ 449.58
Decimo Cuarto Sueldo	\$ 425.00
Analista de calidad	
Sueldo Mensual	\$ 449.58
Aporte Patronal	\$ 50.10
Decimo Tercer Sueldo	\$ 449.33
Decimo Cuarto Sueldo	\$ 425.00
Operadores	
Sueldo Mensual	\$ 444.91
Aporte Patronal	\$ 49.61
Decimo Tercer Sueldo	\$ 444.91

Apéndice B.4 Flujo de caja del proyecto – Sistema electrotérmico

DETALLE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VENTAS		\$93 968.47	\$100 247.27	\$106 945.61	\$114 091.52	\$121 714.91	\$129 847.68	\$138 523.86	\$147 779.77	\$157 654.15	\$168 188.31
Costos Variables		\$24 812.88	\$26 470.83	\$28 239.56	\$30 126.48	\$32 139.48	\$34 286.98	\$36 577.97	\$39 022.05	\$41 629.43	\$44 411.03
MARGEN DE CONTRIBUCION		\$69 155.59	\$73 776.44	\$78 706.04	\$83 965.04	\$89 575.43	\$95 560.70	\$101 945.89	\$108 757.73	\$116 024.72	\$123 777.28
Costos Fijos		\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60	\$13 353.60
Depreciación		\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00
Amortización de activos diferidos		\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00
UTILIDAD OPERATIVA		\$53 291.99	\$57 912.84	\$62 842.44	\$68 101.44	\$73 711.83	\$79 697.10	\$86 082.29	\$92 894.13	\$100 161.12	\$107 913.68
Gastos Financieros (Intereses)		\$16 323.55	\$14 557.48	\$12 629.81	\$10 525.76	\$8 229.19	\$5 722.49	\$2 986.42			
UTILIDAD ANTES DE PARTICIPACION		\$36 968.43	\$43 355.36	\$50 212.63	\$57 575.67	\$65 482.64	\$73 974.61	\$83 095.87	\$92 894.13	\$100 161.12	\$107 913.68
15% TRABAJADORES		\$5 545.26	\$6 503.30	\$7 531.89	\$8 636.35	\$9 822.40	\$11 096.19	\$12 464.38	\$13 934.12	\$15 024.17	\$16 187.05
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		\$31 423.17	\$36 852.05	\$42 680.74	\$48 939.32	\$55 660.24	\$62 878.42	\$70 631.49	\$78 960.01	\$85 136.95	\$91 726.63
25% IMPUESTOS		\$7 855.79	\$9 213.01	\$10 670.18	\$12 234.83	\$13 915.06	\$15 719.60	\$17 657.87	\$19 740.00	\$21 284.24	\$22 931.66
UTILIDAD NETA		\$23 567.38	\$27 639.04	\$32 010.55	\$36 704.49	\$41 745.18	\$47 158.81	\$52 973.62	\$59 220.01	\$63 852.72	\$68 794.97
Amortización Deuda		\$35 624.89	\$35 624.89	\$35 624.89	\$35 624.89		\$35 624.89	\$35 624.89	\$35 624.89	\$35 624.89	\$35 624.89
Depreciación		\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00	\$2 380.00
Amortización de diferidos		\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00
Inversión	\$(81 009.53)										
Capital de trabajo	(\$ 7 589.42)										
Préstamo	\$ 7 589.42										
Valor de Liquidación de Capital de trabajo											\$7 589.42
Valor de desecho de Activos Fijos				\$198.33			\$198.33			\$198.33	\$11 900.00
FLUJO DE CAJA NETO	\$ (81 009.53)	-\$9 547.51	-\$5 475.85	-\$906.00	\$3 589.61	\$8 630.29	\$14 242.26	\$19 858.73	\$26 105.12	\$30 936.16	\$55 169.50

APÉNDICE C

Apéndice C.1 Depreciación anual de equipos – Sistema microondas

Equipo	Depreciación Anual	Valor	Total	Valor de Salvamento
Reactor	10.00%	\$ 5 600.00	\$ 560.00	\$ 2 800.00
Tamiz	10.00%	\$ 1 680.00	\$ 168.00	\$ 840.00
Evaporador	10.00%	\$ 17 472.00	\$ 1 747.20	\$ 8 736.00
Destilador flash	10.00%	\$ 2 240.00	\$ 224.00	\$ 1 120.00
Split	10.00%	\$ 6 240.00	\$ 624.00	\$ 3 120.00
Tanques	10.00%	\$ 1 120.00	\$ 112.00	\$ 560.00
Destilador fraccionado	10.00%	\$ 11 200.00	\$ 1 120.00	\$ 5 600.00
Total			\$ 4 555.20	\$ 22 776.00

Apéndice C.2 Tabla de amortización – Sistema microondas

Tasa de Interés		9.15%	Años		7
Moneda		Dólares	Capital		\$ 191.815.92
AÑOS	CAPITAL	INTERESES	PAGO	SALDO	
0				\$ 191 815.92	
1	\$ 20 752.88	\$ 17 551.16	\$ 38 304.04	\$ 171 063.05	
2	\$ 22 651.77	\$ 15 652.27	\$ 38 304.04	\$ 148 411.28	
3	\$ 24 724.40	\$ 13 579.63	\$ 38 304.04	\$ 123 686.87	
4	\$ 26 986.69	\$ 11 317.35	\$ 38 304.04	\$ 96 700.19	
5	\$ 29 455.97	\$ 8 848.07	\$ 38 304.04	\$ 67 244.22	
6	\$ 32 151.19	\$ 6 152.85	\$ 38 304.04	\$ 35 093.02	
7	\$ 35 093.02	\$ 3 211.01	\$ 38 304.04	\$ -	

Apéndice C.3 Salario de personal – Sistema microondas

Descripción	Valor
Supervisor de área	
Sueldo Mensual	\$ 449.58
Aporte Patronal	\$ 50.13
Decimo Tercer Sueldo	\$ 449.58
Decimo Cuarto Sueldo	\$ 425.00
Analista de calidad	
Sueldo Mensual	\$ 449.58
Aporte Patronal	\$ 50.10
Decimo Tercer Sueldo	\$ 449.33
Decimo Cuarto Sueldo	\$ 425.00
Operadores	
Sueldo Mensual	\$ 444.91
Aporte Patronal	\$ 49.61
Decimo Tercer Sueldo	\$ 444.91

Apéndice C.4 Flujo de caja del proyecto – Sistema microondas

DETALLE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VENTAS		\$181 800.00	\$193 947.55	\$206 906.77	\$220 731.90	\$235 480.81	\$251 215.21	\$268 000.95	\$285 908.28	\$305 012.16	\$325 392.51
Costos Variables		\$23 671.09	\$25 252.75	\$26 940.09	\$28 740.18	\$30 660.55	\$32 709.23	\$34 894.80	\$37 226.41	\$39 713.81	\$42 367.42
MARGEN DE CONTRIBUCION		\$158 128.91	\$168 694.79	\$179 966.67	\$191 991.72	\$204 820.26	\$218 505.97	\$233 106.15	\$248 681.88	\$265 298.35	\$283 025.10
Costos Fijos		\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60	\$31 353.60
Depreciación		\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20
Amortización de activos diferidos		\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00
UTILIDAD OPERATIVA		\$122 090.11	\$132 655.99	\$143 927.87	\$155 952.92	\$168 781.46	\$182 467.17	\$197 067.35	\$212 643.08	\$229 259.55	\$246 986.30
Gastos Financieros (Intereses)		\$17 551.16	\$15 652.27	\$13 579.63	\$11 317.35	\$8 848.07	\$6 152.85	\$3 211.01			
UTILIDAD ANTES DE PARTICIPACION		\$104 538.95	\$117 003.73	\$130 348.24	\$144 635.57	\$159 933.39	\$176 314.33	\$193 856.33	\$212 643.08	\$229 259.55	\$246 986.30
15% TRABAJADORES		\$15 680.84	\$17 550.56	\$19 552.24	\$21 695.34	\$23 990.01	\$26 447.15	\$29 078.45	\$31 896.46	\$34 388.93	\$37 047.94
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		\$88 858.11	\$99 453.17	\$110 796.01	\$122 940.24	\$135 943.38	\$149 867.18	\$164 777.88	\$180 746.61	\$194 870.61	\$209 938.35
25% IMPUESTOS		\$22 214.53	\$24 863.29	\$27 699.00	\$30 735.06	\$33 985.85	\$37 466.79	\$41 194.47	\$45 186.65	\$48 717.65	\$52 484.59
UTILIDAD NETA		\$66 643.58	\$74 589.87	\$83 097.00	\$92 205.18	\$101 957.54	\$112 400.38	\$123 583.41	\$135 559.96	\$146 152.96	\$157 453.77
Amortización Deuda		\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04	\$38 304.04
Depreciación		\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20	\$4 555.20
Amortización de diferidos		\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00	\$130.00
Inversión	\$(93 159.56)										
Capital de trabajo	(\$22 523.05)										
Préstamo	\$22 523.05										
Valor de Liquidación de Capital de trabajo											\$22 523.05
Valor de desecho de Activos Fijos				\$379.60			\$379.60			\$379.60	\$22 776.00
FLUJO DE CAJA NETO	-\$93 159.56	\$33 024.74	\$40 971.04	\$49 857.77	\$58 586.34	\$68 338.70	\$79 161.15	\$89 964.58	\$101 941.12	\$112 913.72	\$169 133.97